SEPTIEMBRE 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CUANTICA
Autoorganización del espaciotiempo

AGRICULTURA
Cultivo sostenible: el fin del arado

ASTRONOMIA
¿Por qué son diferentes las dos caras de la Luna?

NEUROLOGIA
Aptitudes cerebrales para la danza

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

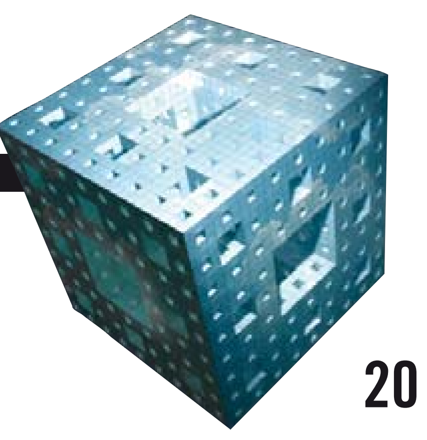
MIGRACIONES PREHISTORICAS

Nuevos datos genéticos descubren las rutas de las primeras migraciones humanas

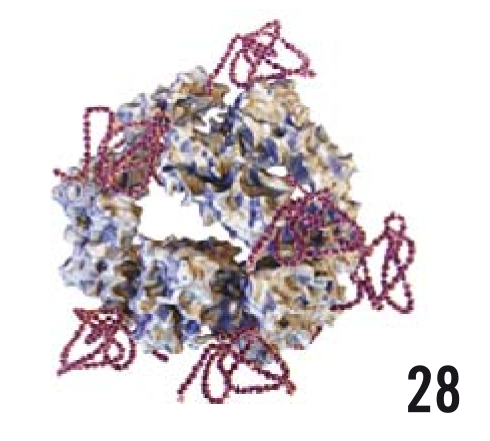
00384
9 770210 136004

SUMARIO

Septiembre de 2008/ Número 384




El espaciotiempo, ¿es fractal?



Las chaperonas se encuentran en todos los organismos.



Con mares y sin mares, de corteza fina y corteza gruesa: dos caras lunares muy diferentes y un porqué aún oscuro.



El impacto de 1908 en Tunguska quizá creó un remoto lago siberiano.

ARTICULOS



Desde el Africa oriental hasta el resto del mundo: la genética reconstruye las migraciones primitivas.



La danza constituye una forma fundamental de expresión humana.



El espartal optimiza la captación de escorrentías.

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Valle del silencio, 28 4.º J
28039 Madrid
Tel. 915 759 278 – Fax 918 276 474
Móvil 649 933 834

Cataluña:
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 934 143 344
Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Pilar García Villalba: *Huellas de un pasado lejano*, *Ciencia y sociedad*; Ramón Pascual: *El universo cuántico autoorganizado*; Juan Manuel González Mañas: *Función biológica de las chaperonas*; M.ª Rosa Zapatero: *La Luna de las dos caras*; Sònia Ambròs Albesa: *El misterio de Tunguska*; J. Vilardell: *Agricultura sin labranza*, *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Puesta al día*; Bruno Moreno: *Apuntes*, *Ciencia y sociedad*; Anna Ferran: *Perfiles*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: George Retseck

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Proceso creativo. «El descubrimiento más sorprendente aportado por los científicos estriba precisamente en la misma ciencia. Su importancia puede compararse a la de la invención de la pintura rupestre o de la escritura. Como aquellas creaciones del hombre primitivo, la ciencia es un intento de dominar nuestro entorno penetrando en él y entendiéndolo desde dentro. Y como ellos, la ciencia ha dado un paso sin duda crítico y sin retroceso en el desarrollo humano. Una sociedad futura sin ciencia resulta inconcebible.
—Jacob Bronowski»

Novedades en física. «Según mi escéptica opinión, puede que nos hallemos tan lejos de saber qué son las partículas elementales como lo estaban de la mecánica cuántica los sucesores de Newton. Lo mismo que ellos, tenemos ante nosotros dos tareas formidables. Una es estudiar e investigar la matemática de las teorías existentes. La teoría cuántica de campos puede ser o no correcta, pero desde luego encierra una hondura matemática que requiere el genio de un Hamilton o de un Euler para adentrarse en ella. La otra es seguir adelante con la investigación del amplio abanico de fenómenos físicos de los que no dan cuenta las teorías disponibles. Ello supone proseguir con la experimentación en el campo de la física de partículas hoy en boga. Entre las partes de la física que las recientes teorías sobre partículas elementales han dejado fuera destacan la gravitación y la cosmología.
—Freeman Dyson»

Buena forma física. «Ante una nueva mutación de un organismo, o un cambio fundamental en sus condiciones de vida, los biólogos no suelen estar en situación de predecir sus posibilidades futuras. Deben esperar y ver. Por ejemplo, el mamut peludo parece haber sido un animal admirable, inteligente y bien dotado. Ahora que se ha extinguido, tratamos de averiguar por qué se malogró. Dudo que ningún biólogo crea que podría haber predicho aquella desaparición. La buena forma física y la supervivencia constituyen por naturaleza estimaciones de un comportamiento pasado. —George Wald»

[NOTA: Wald ganó en 1967 el premio Nobel de Medicina]

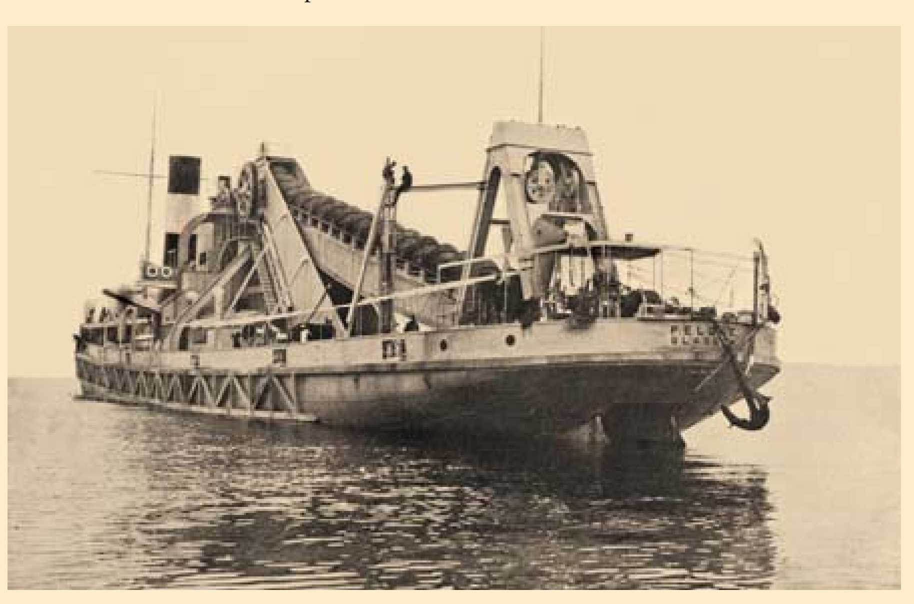
...cien años

Víctimas mortales. «Rara vez ha ocurrido un desastre tan lamentablemente trágico como el inesperado desplome del aeroplano Wright, que causó la muerte del teniente Thomas Selfridge, joven oficial prometedor, y lesiones terribles al talentoso inventor Orville Wright. Pese a lo deplorable del accidente, no permitamos que desprestigie al arte de la navegación aérea. Si bien pone de relieve los riesgos, nada hay en el percance que debilite nuestra fe en los principios sobre los que los hermanos Wright construyeron su máquina y lograron tan brillante éxito.»

Una draga de gran tamaño. «En conexión con el ensanchamiento y el ahondamiento del Canal de Suez en Puerto Said, las autoridades han aumentado en fecha reciente su flota de dragas con una nueva embarcación, que se sitúa como la mayor draga de cangilones a flote. La 'Pèluse' ha sido construida por Lobnitz & Co. en sus astilleros de Renfrew, a orillas del río Clyde (Escocia); es de constitución similar a la 'Ptolomée', que la misma empresa suministró a la compañía del canal hace unos dos años. La 'Pèluse' tiene una eslora de 93 metros y un motor de dragado de 600 caballos. Todos los engranajes de a bordo tienen los dentados tallados a máquina.»

...ciento cincuenta años

Rufianes. «Hace algún tiempo protestamos enérgicamente contra el modo de actuar del doctor Thompson y la Junta de Sanidad de esta ciudad [Nueva York], por la manera descuidada en que tratan los barcos infectados; este periódico fue el primero en llamar la atención del público hacia su oficial estupidez. La consecuencia de tan descuidada conducta es la aparición de brotes de fiebre amarilla en tres puntos de Staten Island. Después de escrito lo anterior, una turba ha incendiado hasta los cimientos los edificios en cuarentena y dejado desatendidos a los enfermos. A los valientes médicos hay que reconocerles el mérito de haber permanecido en sus puestos durante la conflagración. Esperamos que los autores de los daños sean prendidos y castigados, pues permitir que una banda de rufianes se tome la justicia por su mano no es modo de reparar un mal.»



MAQUINAS CONTRA EL FANGO. Una enorme draga de cangilones para el Canal de Suez, 1909.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCIX, N.º 11, 12 DE SEPTIEMBRE, 1908

INMUNOLOGIA

¿Una conexión entre la leche y la diabetes?

Algunas investigaciones han sugerido que los productos que contienen proteínas de leche de vaca podrían aumentar el riesgo que el niño corre de contraer posteriormente la diabetes de tipo 1. Un nuevo estudio, realizado por Marcia F. Goldfarb, de Anatek-EP, un laboratorio de investigación de proteínas en Portland, Maine, indica el mecanismo potencial de acción. El sistema inmunitario inmaduro de un recién nacido podría destruir la proteína humana glicodelina, en un esfuerzo mal encaminado por eliminar la proteína similar de la leche de vaca. Este error provocaría la sobreproducción de células T, que ayudan a proteger el cuerpo contra las infecciones. La sobreproducción podría atacar a las células productoras de insulina del páncreas y causar la diabetes, Un ensayo aleatorio internacional de vastas proporciones, actualmente en curso, ayudará a zanjar la cuestión de la leche de vaca y el riesgo de diabetes.



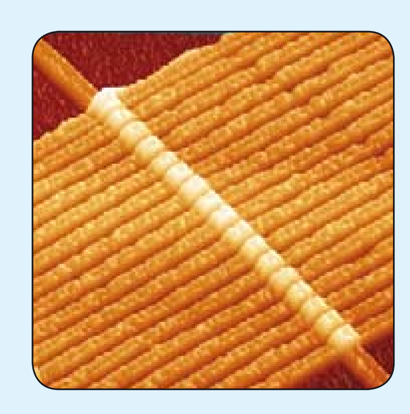
—Keren Blankfeld Schultz

ELECTRONICA

Los memristores

Unos 40 años se ha tardado en incorporar un nuevo elemento a la lista de componentes de los circuitos eléctricos (bobinas, condensadores y resistencias). Se trata del memristor, o resistencia con memoria. Consiste en un interruptor eléctrico de escala nanométrica que "recuerda" si está encendido o apagado cuando se corta la corriente. Podría ser una herramienta útil para construir memorias informáticas no volátiles o para almacenar transistores de forma más densa con las que se puedan fabricar chips más pequeños. Un equipo de Hewlett-Packard construyó el dispositivo insertando una capa de dióxido de titanio de tres nanómetros de espesor entre dos capas de platino.

—J. R. Minkel



Se construyeron 17 memristores, con cables de platino de 50 nanómetros de diámetro, cruzados por otro cable.

ONCOLOGIA

Matrimonio canceroso

La fusión de células tumorales con glóbulos blancos podría ser el secreto de que un cáncer se extienda por el cuerpo. Dichos híbridos combinarían la capacidad natural de los glóbulos blancos de moverse por el cuerpo con la tendencia del cáncer a una división celular incontrolada. La teoría de la fusión se propuso ya a principios del siglo XX. En una investigación que ha durado 15 años, un grupo de la Universidad de Yale fusionó glóbulos blancos con células tumorales. Estos híbridos eran muy metastáticos e, implantados en ratones, resultaban letales. Posteriormente, encontraron que esos híbridos aparecían de forma natural en ratones. En estudios recientes de pacientes de cáncer que recibieron un trasplante de médula, se encontraron genes de los glóbulos blancos de la médula en las células tumorales. Dicha fusión podría haber ocurrido cuando los glóbulos blancos englobaron las células tumorales.

—Charles Q. Choi

CELULAS MADRE

Piel para el parkinson

Células dérmicas de un ratón adulto, reprogramadas para que actúen como células troncales embrionarias, han silenciado en ratas los síntomas de la enfermedad de Parkinson. Se les inyectó a ratas sanas una toxina que destruía las neuronas productoras de dopamina, lo que provocaba síntomas motores reminiscentes del parkinson. A continuación se trató a los roedores con las células modificadas (llamadas células madre pluripotentes inducidas.) La mayoría de las ratas dieron muestra de haber mejorado su equilibrio y coordinación al cabo de cuatro semanas; una de ellas presentaba incluso mayor actividad dopamínica. No obstante, son muchas las cuestiones que han de quedar resueltas antes de que el procedimiento se aplique a las personas. Para empezar, todavía no se ha conseguido remedar el parkinson de forma exacta en los roedores, pues se trata de una enfermedad muy compleja. Además, se sabe que los retrovirus utilizados para modificar las células dérmicas son carcinógenos. En cualquier caso, parece que ésta es la primera vez en que células manipuladas se han integrado en tejidos cerebrales y han invertido lesiones neurodegenerativas.

—Nikhil Swaminathan

ALTRENDO IMAGES/GETTY IMAGES (*bebé*); CORTESIA DE J. J. YANG *HP Labs* (*memristor*)

ECOLOGIA

Tensión alimenticia

Los picos largos y finos de los falaropos, aves costeras, no son muy útiles para absorber agua y los sabrosos crustáceos contenidos en ella. Por eso aprovechan la fuerza atractiva de los líquidos, denominada tensión superficial, para hacer que sus presas suban. Primero nadan rápidamente en pequeños círculos por la superficie del agua, para crear un remolino que impulsa hacia arriba a los organismos que se encuentren a su alcance. Después, pican en el agua y abren y cierran prestos sus picos. Este movimiento de tijera tira de las gotas, de unos dos milímetros de tamaño, las aplasta y las mueve desde la punta del pico hasta la boca. En experimentos con picos mecánicos, un grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts y del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia ha encontrado que las gotículas no se mueven bien si el agua contiene aceite, detergentes y otros contaminantes que alteran la tensión superficial del agua.

—Charles Q. Choi



El falaropo, ave costera, depende de la tensión superficial del agua para alimentarse.

NEUROLOGIA

Ataque preventivo contra los errores por pérdida de concentración

Todo el mundo ha cometido un error por quedarse con la mente en blanco durante una tarea monótona. La pérdida de concentración o de actividad cerebral, sin embargo, no es la única culpable de un error así. Gracias a los patrones de actividad de una serie de regiones cerebrales asociadas al mantenimiento del esfuerzo durante una tarea, se puede predecir el comportamiento deficiente hasta 30 segundos antes de que se produzca. Se puede así evitar el error inminente. Un grupo de investigadores de la Universidad de Bergen, en Noruega, examinaron con resonancia magnética funcional el cerebro de individuos que realizaban una tarea simple y tediosa: determinar las direcciones correctas de las flechas en un monitor de ordenador.

La actividad en la red de realización de tareas del cerebro se redujo antes de que se produjera un error y, una vez que los individuos detectaron su error, se reanudó el patrón de actividad. Según el director de la investigación, Tom Eichele, el paso siguiente para predecir este tipo de errores consistirá en el uso de la electroencefalografía, portátil e inalámbrica. Con ella la predicción tendría una aplicación más clara en la práctica.

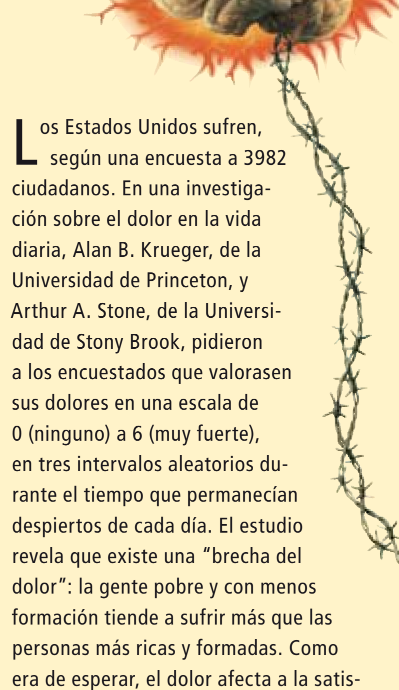
—Keren Blankfeld Schultz



Un trabajo aburrido puede provocar errores de pérdida de concentración.

DATOS

Personas que sufren



Los Estados Unidos sufren, según una encuesta a 3982 ciudadanos. En una investigación sobre el dolor en la vida diaria, Alan B. Krueger, de la Universidad de Princeton, y Arthur A. Stone, de la Universidad de Stony Brook, pidieron a los encuestados que valorasen sus dolores en una escala de 0 (ninguno) a 6 (muy fuerte), en tres intervalos aleatorios durante el tiempo que permanecían despiertos de cada día. El estudio revela que existe una "brecha del dolor": la gente pobre y con menos formación tiende a sufrir más que las personas más ricas y formadas. Como era de esperar, el dolor afecta a la satisfacción general.

Porcentaje de estadounidenses que sufren dolor en un momento dado: 28

PORCENTAJE DE PERSONAS CON DOLORES QUE:

Ganan menos de 30.000 dólares: 34,2
Ganan más de 100.000 dólares: 22,9
No terminaron la escuela secundaria: 33
Tienen una titulación universitaria: 20,2
No están satisfechos de su vida: 53,9
Clasificación media del dolor: 2,26
Están muy satisfechos de su vida: 22,4
Clasificación media del dolor: 0,66

DINERO GASTADO ANUALMENTE EN:

Analgésicos sin receta: 2600 millones de dólares
Analgésicos con receta: 13.800 millones de dólares
Productividad perdida anualmente debido al dolor: 60.000 millones de dólares

FUENTE: Lancet, *3 de mayo de 2008*

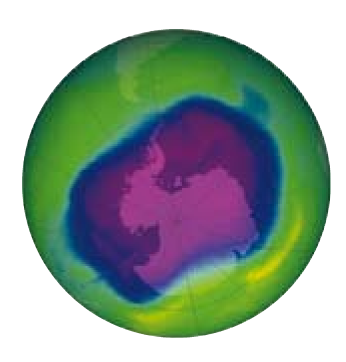
WILDLIFE/PETER ARNOLD, INC. (*ave*); MATT COLLINS (*dibujo*); ALEX MALONEY zefa/Corbis (*abajo*)

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Más ozono: Antártida menos fría

El agujero de ozono antártico, que se forma todas las primaveras, ha mantenido frío el interior de ese continente, a pesar de que el resto del planeta se ha ido calentando en los últimos decenios. Gracias a la prohibición absoluta de halocarburos a escala planetaria, las concentraciones estratosféricas de ozono se recuperan lentamente. Pero según un modelo matemático desarrollado por Judith Perlwitz y sus colaboradores, de la Universidad de Colorado en Boulder, la reducción del agujero de ozono podría acelerar la fusión de los hielos antárticos y modificar las pautas climáticas. La estratosfera inferior, al contener más ozono, absorbería más luz ultravioleta y su temperatura se elevaría unos 9 ºC. Ello, a su vez, fragmentaría la circulación de masas descendentes de aire frío hacia el interior de la Antártida, cuya temperatura se elevaría. Esas alteraciones climáticas harían que Australia fuese aún más cálida y seca, y América del Sur, en cambio, más húmeda. Es probable que estos datos sobre el ozono deban incorporarse a modelos climáticos planetarios, que en su mayoría no han tenido en cuenta tales efectos ni tampoco, en medida suficiente, a la estratosfera. El estudio fue publicado en *Geophysical Research Letters* de 26 de abril.



EL AGUJERO DE OZONO (*violeta*) ha mantenido fría a la Antártida.



Defensa contra la radiación

Se siguen buscando nuevos fármacos contra las lesiones producidas por radiaciones. Entre los más prometedores se cuenta CBLB502, de Cleveland Biolabs, de Búfalo. En *Science* de 11 de abril se informa de que este fármaco, denominado también Protectan, permitió la supervivencia de un 87 por ciento de los ratones sometidos a dosis letales de radiación, pero sólo si les inyectaba en la hora anterior a sufrir las radiaciones. (El fármaco mostró también cierto efecto protector a posteriori, si bien para dosis de radiación menores.) El compuesto, que se administraría en el caso de explosión atómica o de fusión del núcleo de una central, no resguardaba a las células malignas, por lo que podría aplicarse para proteger a las células sanas de pacientes de cáncer sometidos a radioterapia. La compañía debe ahora ensayar el principio activo en humanos.

—David Biello

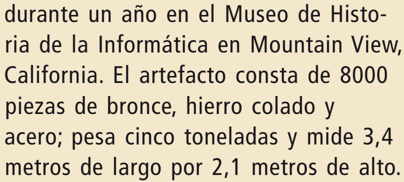
Efecto Hall cuántico

Edwin Hall descubrió en 1879 que un imán desviaba un flujo de electrones, lo mismo que el viento apartaba a los barcos de su rumbo. La versión cuántica del efecto Hall fue observada en 1980: el campo magnético desvía a los electrones de forma discreta, a saltos, como veleros que sufrieran el efecto de rachas intermitentes superpuestas a un viento constante [*véase* "Los electrones en Planilandia", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1996].

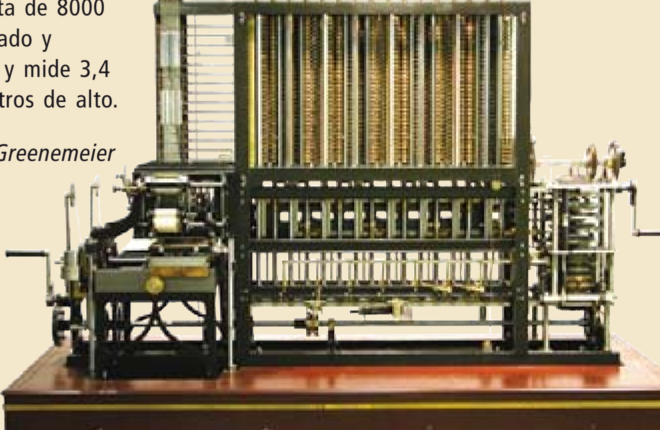
Ahora, físicos de la Universidad de Princeton han demostrado un efecto Hall cuántico sin aplicación de campo magnético alguno. En un cristal de bismuto crearon unas condiciones tan especiales, que cuando los electrones se desplazaban a velocidades próximas a la de la luz, generaban campos magnéticos propios que los desviaban. Estos materiales tan inusitados no sólo elucidan la naturaleza fundamental del efecto Hall, fuertemente vinculado con la superconductividad, sino que pudieran desembocar en nuevas aplicaciones técnicas. El trabajo figura en *Nature* de 24 de abril.

Ingenio de diferencias N.º 2-N.º 2

Charles Babbage, famoso matemático e ingeniero británico del siglo XIX, tiene a su nombre una pléyade de inventos; entre ellos, la galga patrón ferroviaria, el rastrillo frontal de las locomotoras y el oftalmoscopio. Un proyecto célebre, que no logró construir, fue su Ingenio de Diferencias N.º 2, una pieza de técnica victoriana concebida para habérselas con funciones logarítmicas y trigonométricas. En 1991, Doron W. Swade, conservador del Museo de Ciencias de Londres, a partir de planos trazados por Babbage en 1849, construyó la primera versión operativa de este aparato [*véase* "La computadora mecánica de Charles Babbage", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1993], que puede admirarse en ese museo. Swade ha construido ahora un segundo ingenio, desvelado el 10 de mayo, que se exhibirá durante un año en el Museo de Historia de la Informática en Mountain View, California. El artefacto consta de 8000 piezas de bronce, hierro colado y acero; pesa cinco toneladas y mide 3,4 metros de largo por 2,1 metros de alto.



—Larry Greenemeier



CON VIDA: El invento de Charles Babbage en el Museo de Historia de la Informática de Mountain View, California.

NASA (*agujero de ozono*); DORLING KINDERSLEY *Getty Images* (*símbolo radiactividad*); CORTESIA DE DORON D. SWADE (*computadora mecánica*)

Cuellos de botella o mutaciones beneficiosas

Nuevos estudios ponen en entredicho que la evolución humana se haya acelerado en tiempos recientes

Addis Abeba es el centro genético del mundo. No porque allí cuenten con algún talento especial para analizar el genoma, sino porque la variabilidad en el código genético humano disminuye cuando nos alejamos de la capital etíope. Al fin y al cabo, los humanos modernos se originaron en Africa oriental.

La observación ha dado pie a conclusiones divergentes. Tras analizar la constitución genética de diferentes poblaciones, algunos sostienen que le evolución humana se ha acelerado; si no, aducen, no podría explicarse toda la variabilidad. Otros ven en ésta una prueba más de que un número, hasta cierto punto pequeño, de individuos emigraron de Africa y fundaron las poblaciones actuales en el resto del planeta.

En diciembre pasado un grupo de antropólogos y genéticos declararon, tras examinar 3,9 millones de secuencias de ADN de 270 individuos de cuatro poblaciones incluidas en el proyecto HapMap, que la evolución humana se aceleró en los últimos 40.000 años. "Hemos encontrado muchos genes", afirma Gregory Cochran, de la Universidad de Utah y miembro de ese equipo, "que experimentan selección. Pensamos que ese fenómeno se debe al aumento de la fuerza de la selección cuando el hombre se convirtió en agricultor —un cambio ecológico de alcance— y al incremento del número de mutaciones favorables conforme la agricultura promovía el crecimiento del tamaño de la población".

Entre estas mutaciones se incluyen las que han aclarado el tono de la piel y concedido la capacidad de digerir la leche a los adultos de diferentes regiones del mundo. En otra investigación, realizada en el Instituto Pasteur de París, Lluis Quintana Murci y sus colaboradores han registrado unas 55 mutaciones de este tipo.

Sin embargo, otros estudios de cambios en una base de la secuencia de ADN (polimorfismo de un solo nucleótido), en secuencias de ADN (haplotipos) o en secciones más amplias (variación en el número de copias de segmentos del ADN) expresan que los africanos portan la mayor diversidad genómica. Individuos de regiones distintas, por ejemplo africanos y europeos, pueden tener una pequeña cantidad de genes diferentes, pero esta minúscula diferencia queda empequeñecida por la cantidad de código genético que la humanidad comparte. Es probable que entre los genomas de dos africanos haya mayores diferencias que entre el de un africano y el de un europeo. Según Noah Rosenberg, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, que participó en un estudio exhaustivo sobre variabilidad genética, publicado en *Nature* este febrero, "somos una especie joven. Las poblaciones humanas no han estado separadas por períodos tan largos de tiempo como para desarrollar alelos nuevos, propios de cada población."



Semejanza en la diversidad: El código genético de los humanos de poblaciones diferentes es en buena parte único e idéntico.

PIOTR REDLINSKI *Corbis*

Por eso dudan numerosos expertos de que los genes hayan evolucionado mucho en el modesto período que ha trascurrido desde que los humanos pueblan el planeta entero. Además, lo más probable es que la mayoría de las variaciones de las instrucciones genéticas resulten más perjudiciales que beneficiosas, según otro análisis de la variabilidad del ADN.

Pero en vez de una evolución, explica Marcus Feldman, de la Universidad de Stanford, que opere en un número limitado de genes para promover adaptaciones funcionales ("selección positiva") cabe la intervención de un factor demográfico, un "cuello de botella".

Cuello de botella es el nombre que se le da a la reducción de una población a unos pocos individuos, tras lo cual puede haber un nuevo crecimiento. Un estudio de muestras de ADN de 938 personas de 51 poblaciones diferentes en el que ha participado Feldman respalda la hipótesis del cuello de botella como explicación alternativa de la disminución de la variabilidad de haplotipos cuando más lejos se está de Africa.

"Un cuello de botella al que sigue un crecimiento de población puede explicar el ligero aumento en la proporción de la variación de aminoácidos específica

MIGRACION: UNA FUERZA EVOLUTIVA

De los estudios genéticos realizados comienza a emerger una verdad que debería ser obvia y, sin embargo, apenas si se ha reparado en ella. Muchísimas personas de todo el mundo tienen antepasados de más de un sitio y, de más de dos", indica Marcus Feldman, de la Universidad de Stanford. Ha habido mezcla sin cuento. Justamente la magnitud de la mezcla puede servir para identificar los principales centros de migración, como Oriente Medio. "Donde hay grandes masas continentales ininterrumpidas, siempre se ven señales de migración, y donde hay barreras, se ven señales de las barreras", indica. Los mismos signos aparecen en lingüística y paleontología. Esas disciplinas, añade Feldman, "convergen en una imagen coherente de la evolución moderna de la humanidad".

de los americanos-europeos, y esas variaciones alteran la estructura y la estabilidad de proteínas", señala Carlos Bustamante, de la Universidad de Cornell, quien realiza modelos por ordenador para analizar cambios en los genes. Itsik Pe'er, de la Universidad de Columbia, subraya que los cambios demográficos concuerdan con la distribución mundial de los genes humanos.

Una nueva iniciativa, el Proyecto de los 1000 Genomas, podría zanjar la cuestión sobre el detenimiento de la evolución humana. Sus resultados, previstos para dentro de unos años, nos ofrecerán "secuencias de muchos más individuos de muchas más poblaciones", apunta Kirk Lohmueller, del laboratorio de Bustamante.

El proyecto ahondará en el genoma con un detalle desconocido. Según Lisa Brooks, directora del Programa de Variabilidad Genética del Instituto Nacional de Investigación del Genoma Humano de Estados Unidos, obtendrá variantes de una frecuencia del uno por ciento o menos. Añade: "algo que es común en una población resulta improbable que escasee en otra población. Se sigue de nuestra herencia común".

David Biello

Cadenas atómicas zigzagueantes

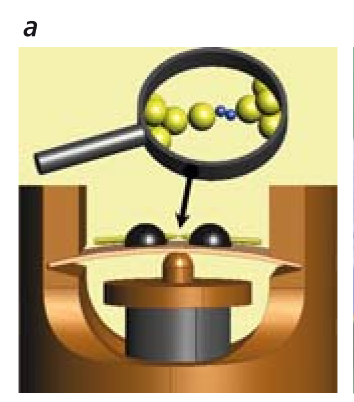
Partiendo barras metálicas muy finas pueden conseguirse cadenas de átomos con un grosor de un solo átomo. Cuando zigzaguean, son más estables

Uno de nosotros dos estaba pescando a orillas del Mediterráneo hace unos meses cuando notó que un pez de bastante tamaño había picado la carnada. Desgraciadamente, el hilo que llevaba la caña era demasiado fino y, tras haber estado resistiéndose un buen rato, el pez dio un coletazo final y rompió el sedal. El pescador fallido reemplazó el hilo por otro de mayor grosor y volvió a intentarlo, esta vez con mejor suerte.

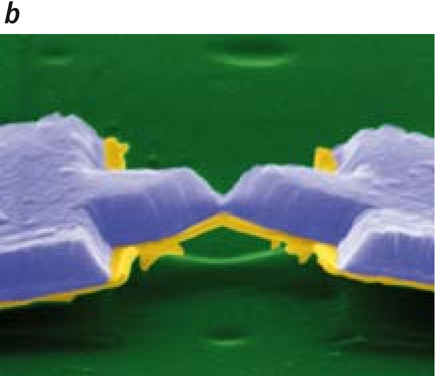
Problemas de resistencia de hilos y cadenas como el anterior son bastante comunes, incluso en campos científicos de vanguardia. En el que nosotros estamos trabajando guarda relación con la cuestión sobre los materiales que pueden formar cadenas atómicas. Pero, ¿pueden los átomos formar cadenas? Sí.

Se ha conseguido fabricar cadenas de un solo átomo de grosor. Hay varias maneras de hacerlo. La más precisa consiste en doblar muy despacio una barra de metal muy fina, convenientemente aislada en una cámara de vacío, hasta que se rompa. Este método, la "técnica de rotura controlada mecánicamente", permite aumentar o disminuir la distancia entre ambos lados de la rotura con una precisión de décimas de angstrom (1 Å = = 0,1 nm = 10^{-10} m). Si el proceso de doblado se lleva a cabo muy despacio y con mucho cuidado, los dos extremos de la barra, justo antes de que se rompa, quedarán unidos sólo por un átomo. Habitualmente, después de la rotura los extremos se vuelven a juntar de nuevo muy despacio, hasta que al tocarse se forma otra vez un contacto atómico.

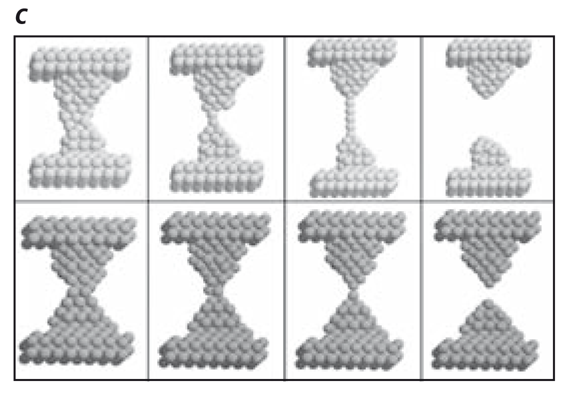
a



b



c



1. Técnica de rotura controlada mecánicamente. (*a*) muestra un esquema del dispositivo experimental, basado en doblar la barra metálica mediante la presión de una punta controlada con un material piezoeléctrico que se encuentra debajo. (*b*) muestra la imagen de una barra que se está rompiendo, obtenida con microscopía electrónica. (*c*) representa esquemáticamente lo que ocurre desde el punto de vista atómico en una constricción de oro en los últimos instantes antes de la rotura, donde se forma una cadena, y en una de cobre, que se rompe justo después de crearse el contacto atómico.

OBTENIDA DEL GRUPO DE QUANTRONICA DE SACLAY (WWW.DRECAM.CEA.FR/DRECAM/SPEC/PRES/QUANTRO/) (*b*); OBTENIDA DEL ARTÍCULO DE S. BAHN Y K. JACOBSEN, *Physical Review Letters*, VOL. 87, N.º 266101; 2001 (*c*)

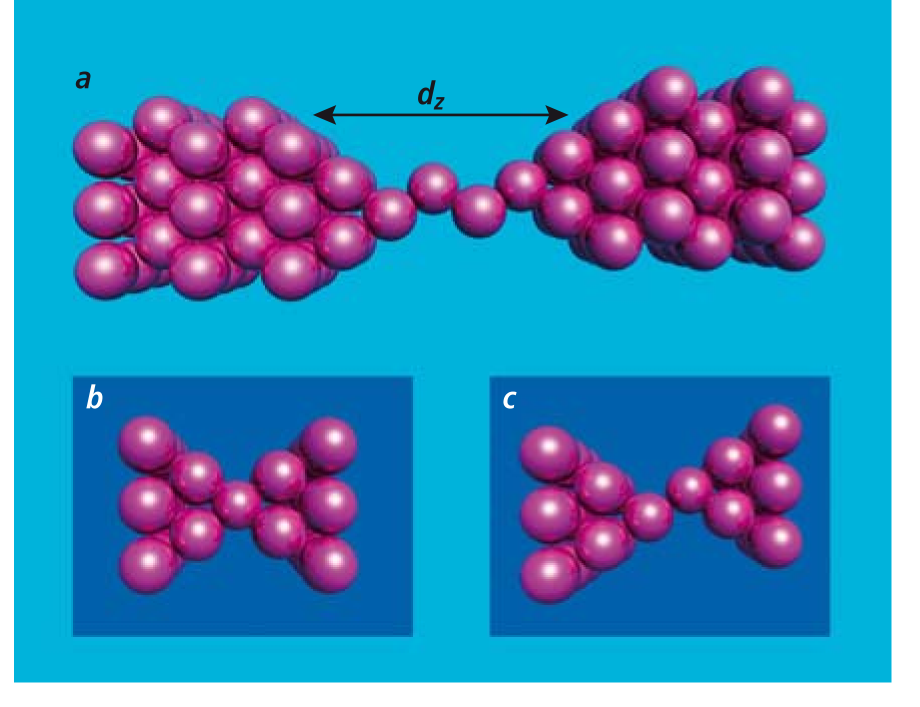
Poco a poco, más átomos de cada lado se van juntando y se vuelve a crear un cuello más o menos ancho.

Durante el proceso de rotura suele medirse a intervalos de tiempo fijos, aunque muy pequeños, la corriente que fluye a través de la unión. A partir del valor obtenido se obtiene la conductancia, medida del grado en que un material deja pasar la corriente, proporcional a la intensidad de ésta e inversamente proporcional al voltaje que la impulsa. Lo que se observa es algo sorprendente: la conductancia no disminuye de forma continua, sino a saltos, como se muestra en la figura 2*a*. En la jerga científica se dice que la conductancia está cuantizada. Tal cuantización, predicha por uno de nosotros en 1988, se debe al desplazamiento de los electrones a lo largo de canales; cada canal contribuye a la conductancia con un cuanto. El número específico de canales que puede albergar cada átomo depende de la estructura electrónica de la última capa. Los átomos de oro, por ejemplo, albergan un solo canal.

Supongamos que tenemos una barra de oro. Nos disponemos a romperla. Puesto que en los últimos pasos del proceso de rotura los átomos se van soltando de la unión uno a uno, los canales van desapareciendo uno a uno. Cuando sólo queda ya el contacto entre dos átomos, uno de cada lado, los electrones pueden fluir por un canal nada más; la conductancia vale entonces un cuanto.

El proceso de rotura y pegado se puede (y se suele) repetir decenas de miles de veces seguidas. Aunque la disposición geométrica de los átomos en dos roturas simultáneas no suele coincidir, sí es bastante similar. Por eso, al realizar miles de mediciones de la conductancia se obtienen unas distribuciones estadísticas, llamadas histogramas, dotados de una serie de picos. Estos picos corresponden a las configuraciones atómicas más probables, las que dan los valores de la conductancia que más se repiten. Un ejemplo se puede ver en el panel *b* de la figura 2.

En la mayoría de los metales, el último escalón "aguanta" unos dos angstrom antes de que la cadena se rompa y la conductancia caiga bruscamente a cero, como se muestra en la figura 2*a*. Pero en el caso de algunos metales, como el oro, el platino y el iridio, este último escalón es con frecuencia bastante más largo (*véase la figura 2c*), prueba de que estos metales forman cadenas atómicas. Sabemos que las cadenas no suelen ser muy largas, constituidas a lo sumo por cinco o seis átomos.



2. Disposición de los átomos en una cadena atómica de platino (*a*) y en cuellos de unión atómica formados por uno (*b*) o dos (*c*) átomos. d_z es la distancia entre los electrodos.

Parece que son muy pocos los elementos de la tabla periódica que pueden formar cadenas. Ni el cobalto, níquel, cobre, aluminio, rodio, paladio, plata y los alcalinos las crean; se rompen en cuanto se establece el contacto atómico. De acuerdo con nuestros propios cálculos, originarían cadenas atómicas, aparte de los conocidos oro, platino e iridio, los elementos del Grupo IV silicio, germanio y estaño; también, el osmio. En el caso del silicio y germanio resultará difícil confirmar que se puedan fabricar cadenas, pues por su carácter de semiconductores es muy complicado medir su conductancia. Con el osmio y el estaño, metales genuinos, cabe esperar que puedan realizarse experimentos que confirmen nuestras predicciones. El caso del estaño es especialmente atractivo, ya que este material se vuelve superconductor a bajas temperaturas, lo que puede dar lugar a nuevos y exóticos fenómenos cuánticos.

Experimentos muy recientes han demostrado que se pueden fabricar cadenas bastante mas largas —de quince o veinte átomos incluso— si se realizan las mediciones en atmósferas de oxígeno o de monóxido de carbono. En estos casos, los átomos del gas se intercalan en la cadena y le confieren estabilidad.

Las simulaciones que hemos realizado, tanto de cadenas atómicas infinitas como de cadenas finitas y constricciones atómicas, algunas de las cuales se muestran en la figura 3, indican que la configuración atómica más estable es aquella en la que los átomos se disponen en zigzag. Estas cadenas "zigzagueantes" se estiran al elongar la barra, como si fueran acordeones. Cuando el estiramiento de la cadena ha alcanzado su máximo, pueden ocurrir dos fenómenos: o bien la cadena se rompe o bien un átomo que estaba en uno de los dos lados de la barra se desplaza e inserta en la cadena, generando una nueva cadena con un átomo más, que recupera parcialmente el zigzag. Ambas cosas ocurren en los experimentos, siendo la segunda bastante más común que la primera. Unas veces la cadena se rompe cuando tiene tres átomos, la vez siguiente con cuatro, la siguiente con dos, etcétera.

La resistencia mecánica de las cadenas atómicas es, por el momento, menos predecible que la de los hilos de pescar. Nunca sabemos si se van a romper o no en un momento determinado. Pero quizás en un futuro hayamos desarrollado la técnica necesaria para utilizarlas de manera más fiable. Quizás podamos aplicarlas para "pescar" otras entidades nanométricas; moléculas, por ejemplo.

Jaime Ferrer Rodríguez
Departamento de Física
Universidad de Oviedo

Víctor M. García Suárez
Departamento de Física
Universidad de Lancaster

Deshielo polar

El hielo se está derritiendo en los polos mucho más rápidamente de lo que predecían los modelos climáticos

La aceleración del calentamiento climático en las regiones polares de la Tierra está provocando una renovada sensación de urgencia entre los científicos. El pasado 28 de febrero, una cámara a bordo del satélite Acqua, de la NASA, tomó imágenes de una masa flotante de hielo, de la magnitud de una ciudad, en el momento en que se desintegraba. A lo largo de los diez días siguientes, siguieron desprendiéndose y fragmentándose bloques de hielo, de modo que para el 8 de marzo la plataforma de Wilkins —más de 12.000 kilómetros cuadrados de hielo flotante junto a la costa de la península Antártica—, había perdido unos 400 kilómetros cuadrados de hielo, que habían ido a parar al océano Pacífico.



Fragmentos dispersos de hielo es todo lo que queda de una zona de 400 kilómetros cuadrados de la plataforma de hielo de Wilkins, en la península Antártica.

JIM ELLIOT *British Antarctic Survey*

Esta ruptura es la última de siete grandes colapsos de plataformas de hielo antárticas en los últimos 30 años, tras unos 400 años de relativa estabilidad. Entre esos derrumbes se incluye la separación de un bloque imponente (de más de 3000 kilómetros cuadrados) de la plataforma de hielo Larsen B, la desintegración de enormes plataformas de hielo en el canal del Príncipe Gustavo y en la ensenada Larsen, y la desaparición de las plataformas de hielo Jones, Larsen A, Muller y Wordie. Todos estos sucesos corroboran las mediciones de temperatura que muestran que la península Antártica Occidental se está calentando a mayor celeridad que ningún otro lugar de la Tierra.

Lo ocurrido en la plataforma Wilkins, oportunamente grabado en vídeo por un equipo de la Investigación Antártica Británica unos días después de que fuera descubierto, ha movilizado a científicos de todo el mundo. Un aire relativamente cálido parece ser el principal culpable. Conforme va derritiéndose el hielo en el verano austral, el agua llena las grietas que se forman en la plataforma. En un clima frío, sólo serían marcas superficiales poco profundas. Sin embargo, el agua líquida puede penetrar por las grietas como una taladradora hasta la base de una plataforma de hielo y partirla en dos.

La fragmentación y derretimiento del hielo flotante no tienen efectos directos sobre los niveles mundiales del mar. Sin embargo, se cree que una plataforma de hielo actúa como un "tapón de botella", que detiene el flujo del glaciar terrestre que alimenta lentamente la plataforma marina. Cuando desaparece el "tapón", el glaciar se abalanza. "Al cabo de unos pocos meses" de una ruptura, explica Ted Scambos, del Centro de Información Nacional sobre la Nieve y el Hielo de la Universidad de Colorado en Boulder, el glaciar "se acelera apreciablemente y, en el plazo de un año o dos, puede estar moviéndose [hacia el océano] hasta cuatro veces más deprisa que cuando la plataforma de hielo permanecía intacta". Eso sí eleva el nivel del mar.

A corto plazo, sin embargo, resultan más preocupantes los cambios en el norte: el declive del hielo en el mar Artico y en la plataforma de hielo de Groenlandia. El aire y el agua superficial, relativamente calientes, están derritiendo el casquete de hielo en el verano polar. El hielo marino, cada vez más reducido, impulsa un círculo vicioso típico: cuanto más hielo se derrite, menos zonas de nieve blanca reflejan la energía solar, se abren regiones más amplias de oscura agua marina, que absorbe la luz, y el hielo se derrita aún más deprisa. Este efecto desbocado, afirma Scambos, podría llevar pronto hacia un clima más cálido en el perímetro ártico y a la pérdida del *permafrost* (suelo congelado) del Artico.

En Groenlandia, la historia de los cambios en los glaciares que dan al mar es similar. Sus puntas marinas están acelerándose y la capa de hielo que hay de-

DESIERTOS NORTEAMERICANOS CAUSADOS POR EL HIELO DERRETIDO

La aceleración del deshielo en el Artico podría causar problemas a las zonas templadas. Diversos modelos predicen que, si el hielo llegase a desaparecer al final del verano, las zonas desérticas emigrarían hacia el norte, provocando condiciones aún más secas que las actuales del sudoeste de los Estados Unidos, del sudeste de Europa y de Oriente medio. Según un estudio publicado el año pasado por Julienne Stroeve y sus colaboradores, del Centro de Información Nacional sobre la Nieve y el Hielo, el hielo del Artico ha disminuido en los últimos 15 años más deprisa de lo que predicen los modelos. La desertización de las latitudes medias podría producirse antes del 2050, es decir, 20 a 40 años antes de lo previsto.

trás se adelgaza por momentos. La medición de las anomalías gravitatorias locales por medio de satélites muestran que la capa de hielo de Groenlandia, en particular en sus zonas meridionales, está perdiendo masa rápidamente. Una cantidad importante de hielo de Groenlandia está entrando a formar parte del océano Atlántico.

Se busca respuestas a dos grandes enigmas: ¿A qué velocidad seguirán sumergiéndose en el mar las capas de hielo? ¿Qué grado de calentamiento adicional derretiría el *permafrost* ártico? Si el *permafrost* se derrite, se liberarán cantidades prodigiosas de metano, ahora atrapado en la tierra congelada. A los veinte años de su liberación, el metano es 72 veces más potente que el dióxido de carbono (CO_2) como gas de efecto invernadero (a los 100 años, sigue siendo 25 veces más potente que el CO_2), de manera que, si el metano se liberase, el planeta se arriesgaría a sufrir una catástrofe climática.

Peter Brown

El arca de los anfibios

Un plan de repoblación para anfibios en peligro de extinción

Los anfibios se están extinguiendo a un ritmo mucho más acelerado que el de ningún otro grupo de organismos. Desde 1980, podrían haber desaparecido 122 especies. De las 6000 que quedan, la mitad están amenazadas y unas 500 podrían extinguirse en los próximos 50 años si no se las cría en cautividad. Zoológicos y otras instituciones colaboran en el "Arca de los Anfibios" para salvar esas especies a medida que vayan desapareciendo de la naturaleza, esperando que un día puedan "volver a casa".

Los anfibios quizá sean especialmente propensos a la extinción porque dependen tanto de la tierra como del agua. Si cualquiera de los dos entornos sufre, ellos también lo hacen. Además, su fina piel, que les permite obtener agua y aire fácilmente, deja también pasar contaminantes.

La amenaza más inmediata para los anfibios es un hongo parasitario, el quitridio de los anfibios, que debieron de extender de forma accidental las ranas de uñas africanas que se repartían por todo el mundo para estudios de laboratorio y pruebas de embarazo (inyectar la orina de una embarazada en una rana hembra hace que la rana ponga huevos). Una vez que el quitridio encuentra una zona adecuada, puede matar allí a la mitad de las especies de anfibios en un plazo de tres meses. A día de hoy, no se sabe detener ni erradicar el hongo en la naturaleza.

Aun así, la mayor amenaza para los anfibios reside en el deterioro o pérdida de hábitat. Una laguna de cría esencial para el sapo concho puertorriqueño "es ahora un aparcamiento junto a la playa", resume con grafismo Jennifer B. Pramuk, responsable de herpetología (anfibios y reptiles) del zoo del Bronx, en Nueva York.

El Arca de los Anfibios se fundó en 2006, poco después de que se conociera la mortandad sufrida. Aunque se han documentado casos de especies criadas en cautividad e introducidas de nuevo en la naturaleza, la enormidad de una tarea que abarca a todo un grupo de animales "no tiene precedentes", afirma Pramuk.

Actualmente, los zoológicos del mundo apenas si están equipados para mantener medio centenar de especies a largo plazo. El Arca de los Anfibios espera reclutar a 500 zoos, acuarios, jardines botánicos, universidades y otras instituciones para que cada una mantenga a una especie. En ese contexto, el zoo del Bronx y el zoo de Toledo, en Ohio, están ayudando a salvar al sapo de Kihansi, un anfibio de brillante color amarillo, del tamaño de una moneda, que en la naturaleza dependía de la fina neblina de las cascadas de la Garganta Kihansi, en Tanzania. Su hábitat se degradó al inaugurarse una presa en el río Kihansi en el año 2000; después, apareció el quitridio. No se ha visto a este sapo en libertad desde el año 2003.



PETER OXFORD *Nature Picture Library*

El proyecto de un arca de los anfibios se propone salvar especies de anfibios en peligro, como esta rana gigante del lago Titicaca.

Para criar especies de anfibios en cautividad se precisan unos 50 especímenes salvajes; si no, se carecería de la diversidad genética necesaria, declara Kevin Zippel, director del programa del Arca. "Basta con un cuarto", añade. "Por el precio de mantener a un solo elefante en cautividad durante un año, unos cien mil euros, se podrían costear los expertos y las instalaciones necesarios para salvar toda una especie de anfibios".

Aun cuando el proyecto salvase una especie, es posible que su vuelta a casa no fuera factible. El hábitat original podría haberse perdido o haber quedado contaminado con quitridio, que permanece presente durante un tiempo desconocido, incluso después de que los anfibios a los que atacaba hayan desaparecido. Volver a introducir de forma segura una especie en la naturaleza implicará, probablemente, la liberación cautelosa de pequeños grupos en zonas protegidas y una vigilancia a largo plazo. Proteger a los anfibios contra el quitridio podría ser difícil, si no imposible, ya que los intentos de inmunizar a los animales sólo serían efectivos durante una generación y los fungicidas eliminarían tipos de hongos beneficiosos y ejercerían efectos secundarios contraproducentes.

Charles Q. Choi

Huellas de un PASADO LEJANO

Gracias al ADN, vamos conociendo mejor el camino que siguió el hombre hasta alcanzar la punta de Sudamérica. Un viaje desde su Africa natal que duró decenas de miles de años

GARY STIX

CONCEPTOS BASICOS

- Se sigue el rastro de las migraciones más antiguas de la humanidad, dejado en huesos, utensilios y ADN. Pero encontrar objetos primitivos resulta difícil.
- La comparación del ADN de distintos grupos de humanos actuales determina cuánto tiempo lleva una población indígena viviendo en una región.
- Los últimos estudios analizan largos segmentos del genoma entero y levantan mapas de los movimientos humanos por toda la Tierra. Describen también el mecanismo de adaptación de los genes a los cambios en la dieta, el clima y las enfermedades.

Una empresa controlada por un hermanastro de Osama Bin Laden anunció el año pasado su deseo de construir uno de los puentes más largos del mundo sobre el estrecho de Bab el Mandeb, la salida del mar Rojo al océano Indico. Si este ambicioso proyecto se llevase a cabo, las oleadas de peregrinos africanos que atravesarían el puente de camino a La Meca repetirían, a unas decenas de metros de altura, la travesía más memorable de la historia de la humanidad. Hace cincuenta o sesenta mil años, un grupo reducido de africanos, unos cientos, quizás unos miles, cruzaron el estrecho en barca. Nunca regresaron.

Se desconoce por qué abandonaron Africa oriental, su tierra de origen. Quizás el clima cambió; tal vez, desapareció su principal fuente de alimento, el marisco. De algo cabe poca duda: esos pioneros llevaron consigo al salir de Africa los rasgos físicos y el comportamiento, el cerebro grande y la capacidad del lenguaje de los humanos modernos. Desde su primer asentamiento asiático, en Yemen, emprendieron un viaje de decenas de miles de años de duración. Cruzarían continentes, y puentes entre continentes, hasta llegar a Tierra del Fuego, en la punta de América del Sur.

Hemos ido ahondando en su migración con la ayuda de huesos fósiles y puntas de lanza descubiertos y conservados en museos. Sin embargo, los restos son demasiado escasos para hacerse una idea cabal de historia tan lejana. Desde hace veinte años, la genética de poblaciones viene rellenando huecos en los archivos paleoantropológicos; en concreto, ha elucidado la ruta de las primeras migraciones de los humanos modernos.

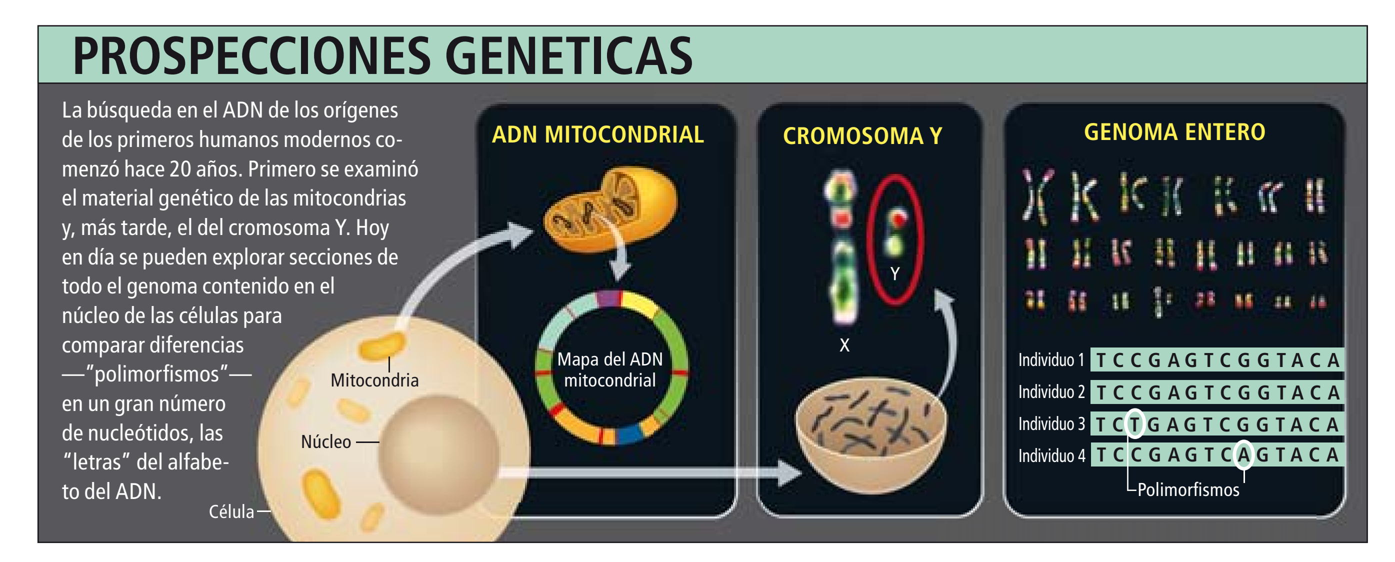
Casi todo nuestro ADN, el 99,9 por ciento de los tres mil millones de "letras", o nucleótidos, que constituyen el genoma, es igual de una persona a otra. No obstante, el último 0,1 por ciento encierra diferencias reveladoras. Una comparación entre africanos del este y americanos aborígenes puede descubrir datos esenciales sobre nuestros antepasados y el avance inexorable de la colonización de un continente a otro. Hasta hace pocos años, el ADN transmitido sólo de padre a hijo y el ADN transmitido sólo de madre a hijo o hija han desempeñado para los genéticos el papel de huellas fósiles. Las investigaciones recientes han depurado el enfoque y no se ciñen a tramos aislados de ADN, sino que rastrean cientos de miles de nucleótidos dispersos por el genoma entero.

Con semejante exploración ampliada, se han generado mapas migratorios globales de una resolución sin precedente, algunos publicados hace escasos meses. Respaldan que el origen del hombre moderno se encuentra en Africa y demuestran que ese continente sirvió de reserva de una diversidad genética que fue poco a poco diseminándose por el resto del mundo. Un árbol familiar genético que arranca de los san de Africa, en las raíces, y acaba en los indios de América del Sur y los isleños del Pacífico, sus ramas más jóvenes.

El estudio de la variabilidad genética humana, una suerte de sistema de localización mundial histórico, se remonta a la Primera Guerra Mundial, cuando dos médicos suizos vieron que la incidencia de un grupo sanguíneo entre los soldados de la guarnición de la ciudad griega de Tesalónica dependía de su na-

ILUSTRACION DE SEAN McCABE; FUENTES: DANIEL SAMBRAUS (*cráneo humano*); PASCAL GOETGHELUCK (*cráneo neandertal*), BIOPHOTO ASSOCIATES (*cromosomas*) *Photo Researchers, Inc.*





cionalidad. A principios de los años cincuenta, Luigi Luca Cavalli-Sforza empezó a formalizar el estudio de las diferencias genéticas entre poblaciones mediante el examen de las proteínas de los grupos sanguíneos. Las variaciones en las proteínas reflejan las diferencias entre los genes que las codifican.

En 1987, Rebecca L. Cann y Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley, publicaron un artículo revolucionario. Se basaba en el análisis del ADN de las mitocondrias, que se transmite por línea materna. (Las mitocondrias son los orgánulos productores de energía de la célula.) Exponían que los sujetos de poblaciones diferentes descendían de una mujer africana que vivió hace unos 200.000 años, conclusión que inmediatamente dio lugar a titulares de prensa que proclamaban el descubrimiento de la "Eva mitocondrial". A pesar de la alusión bíblica, esta Eva no fue la primera mujer; su descendencia sí es la única que ha sobrevivido.

Mitocondrias y cromosomas Y

La rápida y hasta cierto punto predecible velocidad de las mutaciones mitocondriales neutras, ni beneficiosas ni dañinas, convierte a los orgánulos en un reloj molecular. Contar las diferencias en el número de mutaciones (el número de tictacs del reloj) de dos grupos, de dos linajes, permite construir un árbol genético hasta un antepasado común, sea la Eva mitocondrial u otra mujer que fundó un nuevo linaje. La comparación de las edades de linajes de regiones diferentes permite la construcción de un calendario de las migraciones de la humanidad.

El banco de datos de la diversidad humana se amplió con la inclusión, desde 1987, del cromosoma sexual Y, que se transmite sólo de padre a hijo. Este ADN que se hereda sólo entre varones consta de muchos más nucleótidos que el ADN mitocondrial (decenas de millones, por sólo 16.000), lo que aumenta la capacidad de distinguir una población de otra. El análisis del ADN mitocondrial y del cromosoma Y de poblaciones humanas de todo el mundo ha sacado a la luz cientos de marcadores genéticos, sitios del ADN con mutaciones identificables y características de linajes concretos.

El camino que recorrió el hombre de Africa a América, en un viaje que duró decenas de miles de años, puede hoy seguirse en el mapa, como si se hubiesen desplazado, aunque con lentitud extrema, por una red de autopistas. Denominaciones alfanuméricas como las de las carreteras, M-40, digamos, denotan ahora marcadores genéticos. En el caso del cromosoma Y, por ejemplo, un trayecto sería: crúcese Bab el Mandeb por la autopista (el marcador genético) M168, que se transforma en la M89 cuando se dirige hacia el norte a través de la península Arábica. Gírese a la derecha para tomar la M9 y sígase hasta pasada Mesopotamia. Una vez al norte del Hindu Kush, gírese a la izquierda para tomar la M45. En Siberia, gírese a la derecha y tómese la M242, que atraviesa el puente terrestre y llega a Alaska. Sígase por la M3 hasta Sudamérica (*véase el recuadro* "Las rutas del cromosoma Y").

El ADN mitocondrial y el cromosoma Y todavía son instrumentos analíticos poderosos. La Sociedad Geográfica Nacional, IBM y la Fundación de la Familia Waitt aportan, hasta el año 2010, 40 millones de dólares para una investigación que consiste en aplicar esas herramientas: el Proyecto Genográfico, que está reuniendo ADN de 100.000 individuos autóctonos de cada parte del mundo con la colaboración de diez instituciones académicas de diferentes países. Se busca determinar los hitos de las migraciones antiguas. El grupo de Spencer Wells, director del proyecto, ha

DIFERENTES FORMAS DE CORTAR UN GENOMA

Se buscan marcadores genéticos, es decir, patrones característicos de nucleótidos, que difieran de un grupo poblacional a otro y resulten útiles cuando se comparan genomas enteros. Los microsatélites, cortos segmentos repetitivos de nucleótidos que se encuentran en todos los cromosomas (*arriba*), han servido de marcadores durante años. Un nuevo tipo de análisis de genoma entero busca las "variantes en el número de copia": deleciones o duplicaciones de hasta un millón de nucleótidos (*abajo*).



JEN CHRISTIANSEN; CNRI/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*cromosomas*)

descubierto hace poco que los khoisan del sur de Africa se separaron genéticamente de los demás africanos hace 100.000 años. En otro estudio, demostraron que parte del acervo genético masculino del Líbano procede de los cristianos de las cruzadas y los musulmanes de la península Arábica.

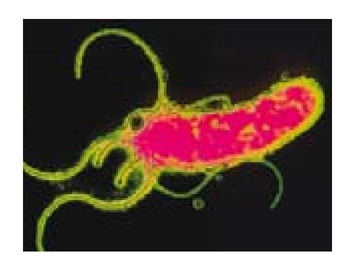
Herramientas más potentes

Los genéticos han tomado muestras de ADN de muchos que viven a lo largo de las rutas migratorias descubiertas. Con todo, la contundencia aparente de los datos a veces engaña. Quienes estudian los orígenes de la humanidad prefieren un fósil que puedan tocar con las manos a un árbol genealógico. El ADN difiere de los isótopos radiactivos con que se fechan los fósiles. La velocidad de mutación puede oscilar de un segmento a otro de ADN.

Lo que no obsta para que los paleoantropólogos se encuentren en un aprieto. Los fósiles escasean y suelen ser incompletos. La primera migración desde Africa hasta Australia se manifiesta en el material genético mitocondrial y del cromosoma Y (gracias a los isleños de Andamán, entre otros), pero apenas si se encuentran restos materiales a lo largo del camino.

La respuesta a la ausencia de útiles líticos y de huesos no es otra que más ADN, proceda de donde proceda. Para reforzar la causa de los genéticos se han analizado los genes de microorganismo que han acompañado al hombre en su desplazamiento. Se han buscado en ellos la señal de pautas migratorias semejantes a las humanas. Entre esos pasajeros hay bacterias, virus e incluso piojos. Aparte de los microorganismos, se cuenta con la ayuda del Proyecto Genoma Humano y otros parecidos; para leer genomas de arriba abajo, han creado herramientas que compensan las deficiencias de los métodos genéticos.

En los últimos años se han logrado descubrimientos espectaculares gracias a la comparación simultánea de multitud de sitios que exhiben variabilidad —sitios "polimorfos"—, intercalados a lo largo de los tres mil millones de nucleótidos del genoma. Los primeros estudios de genoma completo, no hace siquiera diez años, examinaron las diferencias entre poblaciones de unos tramos de ADN cortos y repetitivos, los microsatélites. Ahora, el rastreo del genoma entero permite abarcar más. En febrero, un par de artículos, uno en *Science* y otro en *Nature*, presentaron los dos estudios más ambiciosos realizados hasta la fecha sobre la diversidad humana. Ambos examinaron más de 500.000 polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, el cambio de un nucleótido por otro en un sitio concreto del ADN) en las líneas celulares del Panel de la Diversidad del Genoma Humano, procedentes de más de

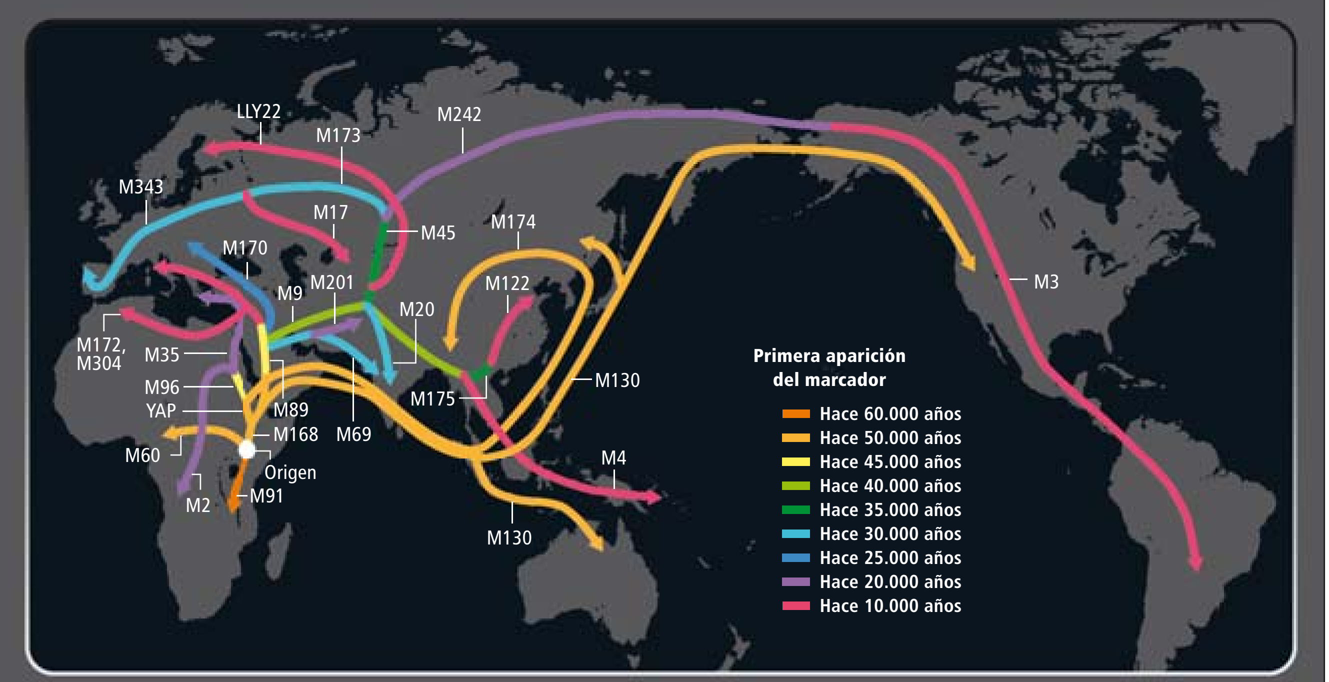


PASAJEROS

Los microorganismos que llevamos a cuestas confirman lo que se ha ido estableciendo sobre las migraciones humanas. Los genes de *Helicobacter pylori* (*arriba*), la bacteria endémica del hombre que causa las úlceras, señalan que el microbio dejó Africa hace unos 55.000 años, al tiempo que los humanos. Una misma línea aparece en las poblaciones de Asia Oriental y en las de América del Sur: confirma el origen asiático de los amerindios.

LAS RUTAS DEL CROMOSOMA Y

Analizando los marcadores genéticos del cromosoma Y de varones de diferentes partes del mundo se puede seguir el rastro de las migraciones primitivas. Cada marcador, por ejemplo M168 o M89, identifica un linaje masculino y dónde se originó. Con la construcción de un árbol evolutivo basado en el estudio de marcadores de muchas personas vivas, se puede determinar la edad aproximada de los linajes.



JEN CHRISTIANSEN; FUENTE DE INFORMACION: NATIONAL GEOGRAPHIC MAPS; P. HAWTIN *Photo Researchers, Inc.* (*bacteria*)

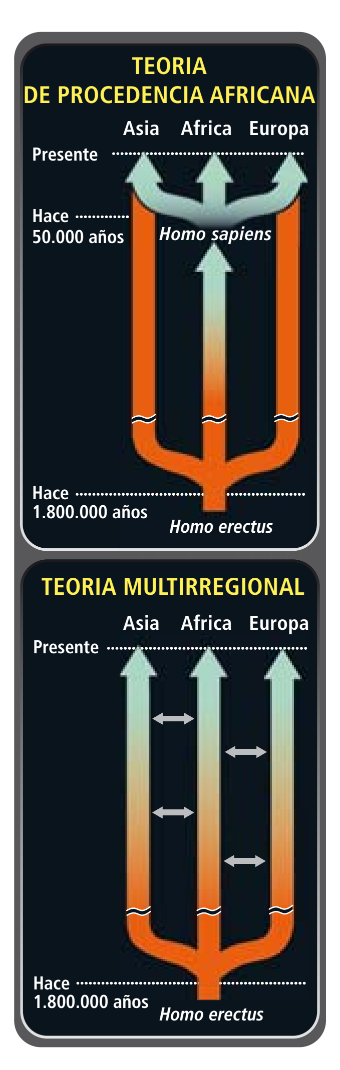
mil individuos de 51 poblaciones de todo el mundo. Las conserva el Centro para el Estudio de Polimorfismos Humanos, de París.

Los dos grupos analizaron esos datos desde enfoques diferentes. Compararon de manera directa los SNP de distintas poblaciones. También analizaron los haplotipos, bloques de ADN con numerosos SNP correlacionados que se heredan intactos a lo largo de muchas generaciones. El grupo que escribió el artículo en *Nature* incorporó una nueva técnica, que estudia la variabilidad mediante la comparación de repeticiones o deleciones (pérdidas) de tramos del ADN de más de 1.000.000 de nucleótidos (la "variabilidad en el número de copias"), a lo largo del genoma de una persona. Este procedimiento concuerda con la tendencia general a explotar el genoma en busca de nuevos marcadores de variación. "Cualquier trozo de genoma puede tener una historia que no refleje los orígenes del genoma tomado en su totalidad", dice Noah A. Rosenberg de la Universidad de Michigan en Ann Arbor y autor principal del artículo en *Nature*. Observar muchos sitios a la vez, explica, puede superar ese problema: "Con miles de marcadores es posible determinar la historia global de las migraciones de la humanidad."

El análisis de cientos de miles de SNP ha permitido distinguir la identidad de poblaciones y ver que el parentesco genético se propaga a veces muy lejos. Así, el rastro de los antepasados de los amerindios aborígenes conduce a siberianos y otros asiáticos. El grupo étnico chino mayoritario, los han, tiene poblaciones diferenciadas en el norte y en el sur. Los beduinos están emparentados con grupos de Europa, Pakistán y Oriente Medio.

Los descubrimientos, que corroboran las investigaciones precedentes en antropología, arqueología, lingüística y biología, así como los estudios anteriores del ADN de las mitocondrias y del cromosoma Y, han aportado un mayor fundamento estadístico a la hipótesis de la procedencia africana de la humanidad. Los nuevos datos ratifican que una pequeña población salió de Africa y medró en un nuevo hogar, hasta que un subgrupo de "fundadores" se escindió del grupo original y partió, proceso que se repetiría hasta que el planeta entero quedó colonizado.

Los grupos errantes desplazaron a las poblaciones humanas arcaicas de *Homo neanderthalensis* y *Homo erectus*, sin haberse cruzado apenas con ellos, si es que se llegó alguna vez. Los nuevos estudios del ADN señalan que siempre que un pequeño grupo se separa, se lleva consigo sólo un subconjunto de la diversidad genética que presentaba en su origen la población africana. Por lo tanto, a medida que



DUELO DE TEORIAS

Según la teoría de la procedencia africana, humanos de rasgos modernos dejaron Africa para colonizar el mundo hace unos 50.000 o 60.000 años. Por el camino reemplazaron a los homínidos arcaicos, como el *Homo erectus*, que salieron de Africa hace 1.800.000 años. La teoría multirregional mantiene, en cambio, que las características modernas evolucionaron no sólo en Africa, sino también en poblaciones de homínidos arcaicos de Asia y Europa. El cruce entre todos estos grupos (*flechas horizontales*) hizo que hubiese una sola especie.

aumenta la distancia desde Africa (y con ella el tiempo transcurrido), decae la diversidad. Se tiene así un medio para seguir los movimientos de las poblaciones. Los americanos aborígenes, que descienden de quienes participaron en las últimas grandes migraciones continentales, tienen mucha menos variedad en sus genomas que los africanos.

Muchos expertos creen que el peso de los datos, reforzados ahora por grandes análisis estadísticos como los de *Science* y *Nature*, da a quienes proponen la teoría de la procedencia africana una ventaja clara en el ya largo debate sobre los orígenes de la humanidad. La hipótesis multirregional, competidora de la teoría de la procedencia africana, sostiene que en los últimos 1.800.000 años hubo poblaciones descendientes de especies arcaicas, como *H. erectus,* que evolucionaron en Europa, Africa y Asia de modo que se convirtieron, poco a poco, en *Homo sapiens*. Gracias a cruces ocasionales, los grupos no se escindieron en especies diferentes.

Ya son pocos los que defienden una interpretación estricta del multirregionalismo. Sin embargo, aún circulan versiones modificadas, sobre todo bajo la forma de intentos de determinar si en *H. sapiens* hay alguna huella genética de encuentros con homínidos. Vinayac Eswaran, del Instituto de Tecnología Indio, con la ayuda de Henry C. Harpending y Alan R. Rogers, de la Universidad de Utah, ha presentado en los últimos años un conjunto de simulaciones según las cuales los humanos, tras emigrar de Africa, se cruzaron a menudo con especies arcaicas, como *H. erectus*. El modelo de Eswaran sugiere que un 80 % del genoma humano moderno puede haber estado sujeto a los efectos de este tipo de cruce.

La huella genética no es tan visible como cabría esperar con esos cruces, pero Harpending tiene una explicación. Un conjunto de genes beneficiosos transportados por emigrantes africanos, quizás unos genes que ayuden en la gestación, confirió una ventaja selectiva que, al final, borró el sello de algunos genes arcaicos. "El resultado es que la población parece tener un parentesco más estrecho con la población original (africana) que aportó los genes favorables que el que en realidad tiene", señala.

¿Somos en parte neandertales?

Eswaran y Harpending no son los únicos que piensan en la posibilidad de encuentros sexuales entre especies. Ciertos restos de esqueletos fósiles de *H. sapiens* tienen rasgos que recuerdan a homínidos anteriores. Nuestro genoma echa leña al fuego del debate.

Según los diagramas de árbol que representan los linajes genéticos, algunas variantes de

JEN CHRISTIANSEN

los genes muestran "un antepasado profundo". Las variantes son mucho más antiguas de lo que deberían, si el hombre hubiese evolucionado desde un solo grupo homogéneo no hace más de 200.000 años. Ese fenómeno refleja un posible cruce entre especies. En 2006, un estudio llamó la atención: Bruce T. Lahn y sus colaboradores, de la Universidad de Chicago, publicaron que una versión del gen *Microcefalina*, relacionado con la regulación del tamaño del cerebro, contiene un haplotipo que pudo haberse transmitido en un encuentro con neandertales hace 40.000 años.

En los próximos meses podría llegar una respuesta más concluyente. El Proyecto Genoma Neandertal, en el que colaboran el Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig y 454 Life Sciences, una empresa de Connecticut que secuencia ADN, tiene previsto acabar a finales de este año un borrador de alrededor del 70 por ciento de la secuencia del ADN extraído de huesos neandertales. Los restos, de 40.000 años de antigüedad, se encontraron en una cueva croata. La publicación de los resultados se espera para seis meses más tarde.

De momento, el proyecto no ha descubierto ningún indicio de un patrón genético que pudiera deberse a la transferencia de ADN entre los dos linajes de homínidos. Según Svante Pääbo, del Max Planck, director del proyecto, "no encontramos datos que confirmen la transferencia, pero tampoco podemos excluirla". Una publicación anterior de su grupo, que analizaba un millón de nucleótidos, una fracción minúscula del genoma, apuntaba a algún intercambio de genes, pero se vio más tarde que el resultado era una falsa señal debida a la contaminación de la muestra. No se ha encontrado todavía la variante de *Microcefalina* a que se refiere Lahn.

La manipulación de una muestra, incluso respirar sobre ella, crea grandes dificultades cuando se trabaja con ADN antiguo. En el trabajo de campo, algunos antropólogos se visten con los trajes que se utilizan en las salas blancas de las fábricas de microchips. Tras el artículo arruinado por la contaminación, el laboratorio de Pääbo ha cambiado los procedimientos seguidos en la sala blanca del Max Planck. Ahora acoplan una marca de cuatro nucleótidos sintéticos al comienzo de cada cadena de material genético neandertal; luego, cada cadena que sale de la máquina de secuenciar pasa una prueba de identidad molecular.

Se calcula que los genomas humano y neandertal son idénticos en alrededor de un 99,5. Conocer la constitución genética de este pariente más cercano de la estirpe humana permitiría la identificación de los sitios del genoma humano alterados por el cruce entre especies y los sitios donde la selección natural favoreció algún rasgo. "Para quien se interese por la evolución humana, no hay otra salida que los neandertales", dice Pääbo. "Son nuestros parientes más cercanos. Se puede acceder a sus genomas, aunque resulte difícil desde el punto de vista técnico. Con la mayoría de los antepasados humanos, será imposible."

Un nuevo trabajo, inédito todavía, revela que el cromosoma Y neandertal difiere del humano. "Ningún hombre tiene un cromosoma Y como el del neandertal", señala Pääbo. Concuerda con resultados anteriores que mostraban que el ADN mitocondrial de los humanos y el de los neandertales se pueden distinguir sin esfuerzo. En noviembre pasado, Pääbo y su grupo describieron una semejanza entre los dos homínidos: restos de neandertal encontrados en España tienen una versión de un gen llamado FOXP2 idéntica a la que, en los humanos, está relacionada con el desarrollo del habla y del lenguaje. Otro grupo conjeturó en un artículo publicado en abril que el gen podría venir del

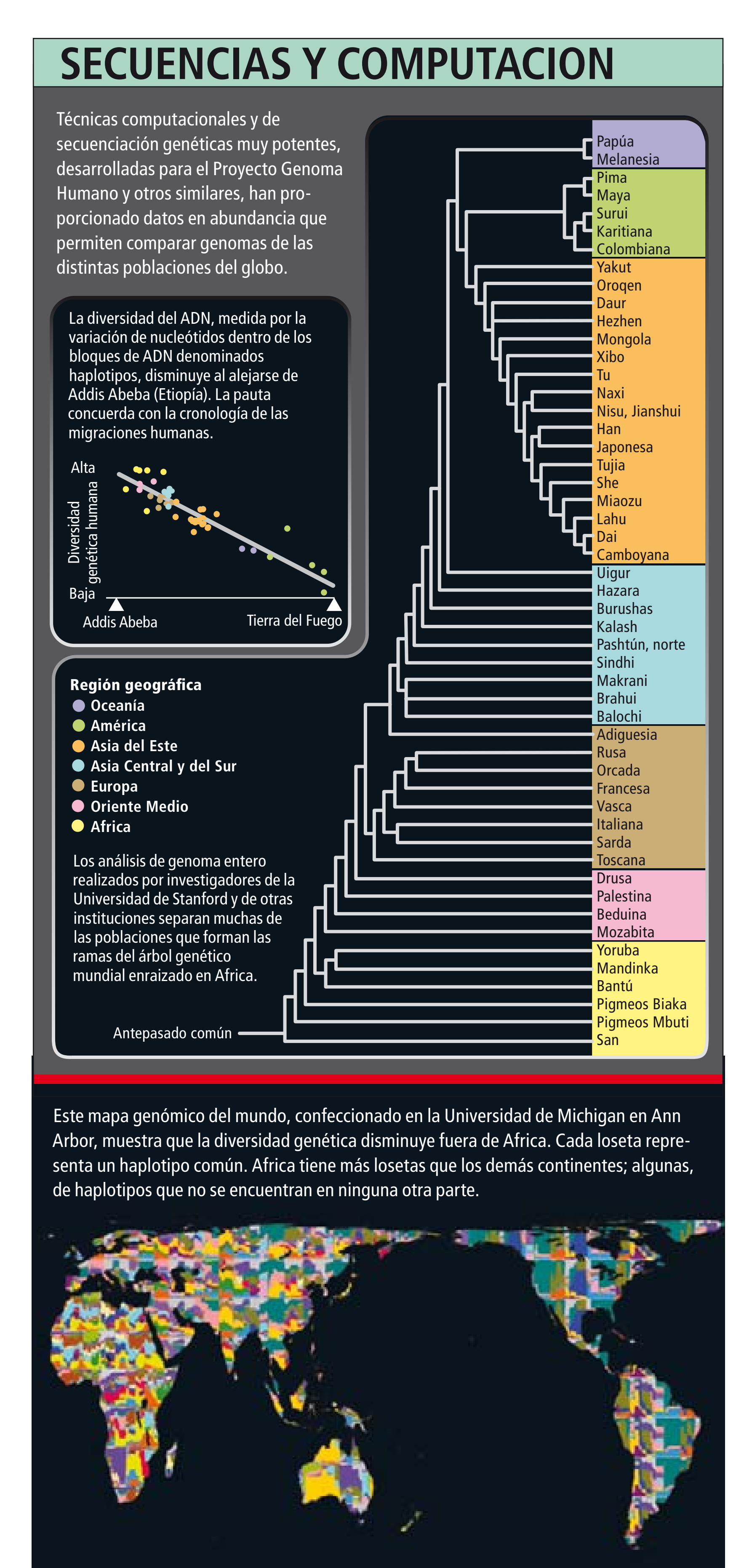
BASTA CON LA GUIA DE TELEFONOS

Para corroborar el archivo genético de la historia de la humanidad basta con hojear ciertos apellidos en un listín de teléfonos. Un grupo de la Universidad de Leicester, dirigido por Mark A. Jobling, publicó el año pasado que los hombres del noroeste de Inglaterra con apellidos que ya se daban allí antes de 1600 tenían gran cantidad de antepasados escandinavos en su cromosoma Y: un legado vikingo. Jobling ha sugerido en otro artículo que la policía científica podrían valerse de este método para restringir el número de sospechosos: los datos proporcionados por el ADN se ligarían a un conjunto de apellidos.



LA CONTAMINACION con ADN humano complica los análisis genéticos de los neandertales. Para proteger las muestras desenterradas, quienes trabajan en la cueva de El Sidrón, en Asturias, llevan trajes como los que se utilizan en las salas blancas.

JAY H. MATTERNES (*Neandertal*); EL SIDRON RESEARCH TEAM (*excavación*)



cruzamiento de las dos especies, aunque no puede descartarse la contaminación.

¿Cómo nos hemos adaptado?

Mientras unos secuencian ADN de fragmentos fósiles de huesos para saber si los humanos se aparearon con otras especies del género *Homo*, otros aplican el análisis de ADN de genoma entero para descubrir qué rasgos controlados por la genética han cambiado por deriva genética (las mutaciones al azar) y cuáles por selección natural a medida que los emigrantes se adaptaban a su nuevo hogar.

Un estudio publicado en *Nature* en febrero expone algunas consecuencias de la disminución de la diversidad genética que se produjo cuando el hombre salió de Africa. Se compararon 40.000 SNP de un grupo de 20 euroamericanos y 15 afroamericanos. Se encontró que los americanos de procedencia europea tenían una proporción más elevada de cambios genéticos perjudiciales, asociados en potencia a enfermedades, que los de origen africano. Sin embargo, los autores se abstuvieron de suponer cualquier efecto específico en la salud. Los estudios reflejan lo que el director del grupo, Carlos Bustamante, llama "eco genético poblacional" de la fundación de Europa. La baja diversidad genética de la limitada población inicial de Europa permitió a un conjunto de mutaciones dañinas dispersarse mucho, y a mutaciones nuevas, también perjudiciales, establecerse cuando el número de individuos empezó a crecer. La selección natural no ha tenido tiempo todavía de suprimir los cambios nocivos.

El análisis de genoma entero empieza, por su parte, a proporcionar una imagen panorámica de la ayuda prestada por la selección natural a la adaptación a los nuevos entornos por los emigrantes. En los últimos dos años, una avalancha de estudios han buscado alteraciones genéticas producidas después de que los humanos dejaran Africa o se dedicasen a la agricultura, alteraciones que parecen haber sido útiles para la supervivencia en las nuevas circunstancias. Los buscadores genéticos han rastreado el HapMap Internacional, un catálogo de haplotipos y de los 3,9 millones de SNP que contienen, correspondientes a norteamericanos con antepasados en el noroeste de Europa y a nigerianos, chinos y japoneses.

Según uno de esos estudios, firmado entre otros por Harpending, el ritmo a que cambia ADN y, por lo tanto, la evolución, se ha acelerado en los últimos 40.000 años. Otro, de Pardis C. Sabeti y sus colaboradores del Instituto Broad de Cambridge (Massachusetts), indica que cientos de regiones del genoma siguen sometidas a selección, entre las que se

MARTIN SOAVE *Universidad de Michigan en Ann Arbor (mapa)*; JEN CHRISTIANSEN *(gráfica y árbol genético)*; FUENTE: *WORLDWIDE HUMAN RELATIONSHIPS INFERRED FROM GENOME-WIDE PATTERNS OF VARIATION*, POR JUN Z. LI ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 319; 2008

Un poco de ADN

En su búsqueda de una descripción más exhaustiva de los orígenes de la humanidad, los genéticos necesitan más muestras de poblaciones indígenas de cada parte del mundo. "Se requiere una mayor resolución en los datos", señala Marcus W. Feldman, de la Universidad de Stanford, coautor de un reciente análisis comparado de genomas enteros. "Si mañana me diesen un millón de dólares, encontraría cien poblaciones más, y necesitamos cinco mil."

Otro obstáculo son las objeciones a este tipo de investigación. En 1991 Luigi Luca Cavalli-Sforza y sus colaboradores delinearon el Proyecto Diversidad del Genoma Humano, que habría creado un depósito de células de 25 individuos, sin parentesco entre sí, por cada una de 400 poblaciones del mundo. El proyecto, sin embargo, fracasó por la resistencia de grupos indígenas a suministrar muestras. Un grupo lo llamó "Proyecto vampiro". A pesar de los concienzudos trámites que garantizaban un consentimiento informado, a algunos grupos les inquietaba que las muestras se utilizasen para crear nuevos fármacos patentados: lo consideraban "biopiratería".

Aquel proyecto sólo contó, por parte del gobierno de los Estados Unidos, de ayuda en la planificación. Una versión más modesta se ha puesto en marcha en estos últimos años. Se basa en líneas celulares procedentes de más de mil individuos. Las reunieron por su cuenta diversos expertos en genética de poblaciones. Esta colección, a la que se llama Panel de la Diversidad del Genoma Humano, se almacena en el Centro para el Estudio de Polimorfismos Humanos, en París. Su base de datos contiene información sobre 51 poblaciones. Varios estudios han sacado ya provecho del Panel; así, dos amplias investigaciones transgenómicas publicadas en *Nature* y *Science* en febrero de este año.

Igual que el Proyecto Diversidad del Genoma Humano, el Proyecto Genográfico, más reciente, que se propone reunir ADN de 100.000 indígenas, está encontrando oposición. El proyecto se atiene a protocolos rigurosos para asegurar el consentimiento informado en la recolección de las muestras y rechaza su empleo en investigación médica. Pese a esas cautelas ha encontrado oposición, en particular de grupos de aborígenes americanos.

No importa qué garantías se den, algunos grupos se mostrarán reacios a ofrecer una muestra de saliva o de sangre. Puede que los investigadores de este campo nunca alcancen su objetivo: obtener un conjunto de muestras que refleje cada una de las sutiles gradaciones de la diversidad genética humana.



LA TOMA DE ADN para el Proyecto Genográfico avanza en Chad. Spencer Wells, director del proyecto, toma una muestra de saliva.

DAVID EVANS *National Geographic*

incluyen zonas que controlan la resistencia a enfermedades, el color de la piel y los folículos capilares que regulan la transpiración. Tales descubrimientos significan que las poblaciones humanas continúan adaptándose a las diferencias regionales en lo concerniente a la exposición solar, la comida y los patógenos. Los africanos no han dejado de evolucionar a medida que su entorno ha ido cambiando.

Uno de los estudios más recientes, dirigido por Lluis Quintana-Murci, del Instituto Pasteur de París, señala que 580 genes, entre ellos algunos que participan en la diabetes, la obesidad y la hipertensión, experimentan selección de manera diferente entre las poblaciones del HapMap, lo que quizás explique las diferencias geográficas en la distribución de las enfermedades y sugiera posibles dianas para nuevos fármacos.

Cuando se piensa en los procesos ligados a la diversidad humana, a veces se va más allá de las dimensiones de los folículos capilares o de la capacidad de digerir la leche. Quizá las investigaciones de las que hablamos aquí incidan pronto en el debate sobre los conceptos de raza y origen étnico. Si se encontrara que una variante de un gen relacionada con la capacidad cognitiva se da más en los europeos que en los africanos, ¿qué significaría? Que el público entendiese más de genética, que comprendiese que un gen no puede ser un interruptor que vuelve a uno listo o tonto, acallaría las cábalas mal encaminadas.

La cultura genética haría que los términos "asiático", "chino" y similares se reemplazaran por atribuciones más sutiles, basadas en las diferentes constituciones genéticas ancestrales encontradas en las recientes exploraciones de genoma entero, como ocurre con la distinción entre los grupos han del sur y han del norte de China. "No hay razas", subraya Quintana-Murci. "Desde el punto de vista de la genética, sólo vemos gradientes geográficos. No existen diferencias tajantes entre europeos y asiáticos. De Irlanda a Japón, no hay fronteras donde, de repente, algo sufra un cambio drástico."

El viaje a través de la historia de la evolución emprendido por la genómica comparada apenas ha echado a andar. La necesidad de más datos y de algoritmos y ordenadores más potentes no tiene límites. Un consorcio internacional anunció en enero su intención de secuenciar mil genomas de poblaciones de diferentes regiones. La acumulación de bases de datos mayores permitirá efectuar simulaciones más realistas de modelos alternativos de la evolución del hombre. Se obtendrá así un mejor cuadro de quiénes somos y de dónde venimos.

Bibliografía complementaria

BEFORE THE DAWN. Nicholas Wade. The Penguin Press, 2006.

DEEP ANCESTRY: INSIDE THE GENOGRAPHIC PROJECT. Spencer Wells. National Geographic, 2006.

HUMAN ORIGINS: WHAT BONES AND GENOMES TELL US ABOUT OURSELVES. Rob DeSalle y Ian Tattersall. Texas A&M University Press, 2008.

NEW DEVELOPMENTS IN THE GENETIC EVIDENCE FOR MODERN HUMAN ORIGINS. Timothy D. Weaver y Charles C. Roseman en *Evolutionary Anthropology*, vol. 17, págs 69-80; 22 de febrero, 2008.

GENETIC EVIDENCE AND THE MODERN HUMAN ORIGIN DEBATE. J. H. Relethford en *Nature Heredity*, publicado en línea, 2008.



CONCEPTOS BASICOS

- Se lleva mucho tiempo intentando encontrar la conciliación de teoría cuántica y teoría general de la relatividad. Sin apenas éxito.
- Para abordar el problema, los autores no recurren a componentes extraños, sino que aplican de forma novedosa leyes ya conocidas a fragmentos de espaciotiempo. Esos pedazos se ordenan por sí mismos, a la manera de moléculas en un cristal.
- En el marco de nuestro enfoque, el espaciotiempo tetradimensional, tal y como lo conocemos, emerge dinámicamente a partir de componentes más fundamentales; a su vez, el espaciotiempo pasa gradualmente de extensión regular, en escalas grandes, a fractal, en pequeñas escalas.

Un nuevo enfoque del viejo problema de la gravedad cuántica retorna a lo básico. Representa el espacio y el tiempo mediante bloques que se ordenan por sí mismos

Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz y Renate Loll

¿Cómo surgieron el espacio y el tiempo? ¿Cómo formaron el regular vacío tetradimensional que sirve de fondo a nuestro mundo físico? ¿Cómo son a las menores distancias? Estas preguntas se encuentran en la frontera última de la ciencia moderna. Impulsan la búsqueda de una teoría de la gravedad cuántica, la largamente buscada unificación de la teoría general de la relatividad de Einstein y la teoría cuántica.

Según la teoría de la relatividad, el espaciotiempo puede tomar a escala macroscópica un sinnúmero de formas diferentes. Esa plasticidad la percibimos como una fuerza, a la que llamamos gravedad. En contraste, la teoría cuántica describe las leyes de la física a escalas atómicas y subatómicas e ignora los efectos gravitacionales. Toda teoría de la gravedad cuántica se propone describir la naturaleza del espaciotiempo a las escalas más pequeñas —los vacíos entre las menores partículas elementales conocidas— mediante las leyes cuánticas y, quizás, explicarla en términos de algún tipo de componente fundamental.

Suele decirse que la teoría de supercuerdas es la principal aspirante a cubrir algún día esos objetivos, pero aún no ha proporcionado respuesta a ninguna de las acuciantes preguntas con las que empieza este artículo. En cambio, siguiendo su propia lógica interna, se ha internado en estadios cada vez más complejos, con nuevos y exóticos ingredientes y relaciones entre ellos, y así ha engendrado una desconcertante multiplicidad de resultados posibles.

En los últimos años, la colaboración entre los tres autores ha ido gestando una prome-

JEAN-FRANCOIS PODEVIN



tedora alternativa a tan transitada autopista de la física teórica. Sigue una receta simple: tómense unos pocos ingredientes muy básicos, ensámblense según los principios cuánticos (no hacen falta cosas extrañas), revuélvase bien, déjese reposar y se tendrá un espaciotiempo cuántico. El proceso es sencillo: un ordenador portátil puede ejecutar una simulación.

En otras palabras, si imaginamos el espaciotiempo vacío como una sustancia inmaterial, consistente en un gran número de pequeñas piezas sin estructura, y si a continuación dejamos que estos bloques constituyentes microscópicos interactúen según sencillas reglas dictadas por la gravedad y la teoría cuántica, se ordenarán por sí mismos, espontáneamente, en un conjunto que, en muchos aspectos, se parece al universo observado. Recuerda a la forma en que las moléculas se autoorganizan en sólidos cristalinos o amorfos.

El espaciotiempo se parecería, pues, a un simple salteado de verduras más que a una elaborada tarta nupcial. Además, a diferencia de otros enfoques de la gravedad cuántica, nuestra receta es muy robusta. Esa palabra, "robusta", conforme a un uso habitual en matemáticas, se refiere a que, cuando variamos los detalles en las simulaciones, el resultado apenas cambia. Tal solidez da motivos para creer que estamos en el buen camino. Si los resultados fueran sensibles a la colocación de cada pieza de ese enorme conjunto, se generaría una cantidad ingente de formas barrocas, cada uno de ellas, *a priori*, con igual probabilidad de producirse, de manera que perderíamos todo poder explicativo de por qué el universo es como es.

En física, biología y otros campos de la ciencia no son desconocidos mecanismos de autoensamblaje y autoorganización de ese estilo. Un hermoso ejemplo son las grandes bandadas de aves, las de estorninos, por ejemplo. Cada pájaro interacciona sólo un pequeño número de aves vecinas; ningún líder les dice qué hacer. Sin embargo, la bandada mantiene su conformación y se mueve como un todo. La bandada posee propiedades colectivas, que no son evidentes en el comportamiento de cada ave. A las propiedades colectivas de esa naturaleza se las llama "emergentes".

Una breve historia de la gravedad cuántica

Los intentos pasados de explicar la estructura cuántica del espaciotiempo mediante propiedades emergentes sólo tuvieron un éxito limitado. Se enraizaban en la gravedad cuántica euclídea, programa de investigación iniciado a finales de los años setenta del siglo pasado y popularizado en el libro de Stephen Hawking *Una breve historia del tiempo.* Se basa en un

principio fundamental de la mecánica cuántica: la superposición. Cualquier objeto, ya sea clásico o cuántico, se halla en un cierto estado, que caracteriza, por ejemplo, su posición y su velocidad. Ahora bien, mientras que el estado de un objeto clásico puede describirse con un conjunto de números, el estado de un objeto cuántico es mucho más rico. Constituye la suma, o superposición, de todos los estados clásicos posibles.

Una bola de billar clásica se mueve a lo largo de una trayectoria única, con una posición y velocidad precisas en cada instante. No podríamos predicar lo mismo del movimiento de un electrón, movimiento que viene descrito por las leyes cuánticas; lo que implica que puede existir simultáneamente en una amplia gama de posiciones y velocidades. Cuando un electrón se desplaza del punto A al punto B en ausencia de fuerzas externas, no se limita a la línea recta entre A y B, sino que abarca todos los caminos disponibles, a la vez. Esta imagen cualitativa, que conjunta todas las trayectorias posibles de los electrones, se traduce en la precisa prescripción matemática de la superposición cuántica, que formuló Richard Feynman, y que consiste en una media ponderada de todas esas distintas posibilidades.

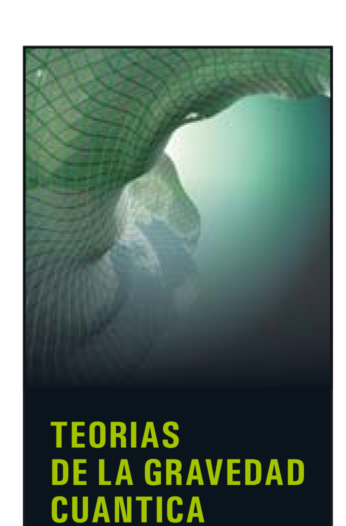
Con esa prescripción se puede calcular la probabilidad de encontrar el electrón en un intervalo cualquiera de posiciones y velocidades, aunque caiga fuera del camino recto que esperaríamos si los electrones obedecieran las leyes de la mecánica clásica. El comportamiento de las partículas resulta mecanicocuántico por las desviaciones de una única trayectoria definida, desviaciones que se denominan "fluctuaciones cuánticas". Cuanto menor sea el sistema físico que se considera, mayor importancia adquieren las fluctuaciones cuánticas.

La gravedad cuántica euclídea aplica el principio de superposición a todo el universo. En este caso, la superposición no consiste en diferentes trayectorias de partículas, sino en diferentes maneras en que el universo entero podría evolucionar en el tiempo; en particular, las formas posibles del espaciotiempo. Para abordar el problema, suelen tomarse en cuenta sólo la forma y el tamaño generales del espaciotiempo, en lugar de cada una de las contorsiones concebibles que podría albergar [*véase* "Cosmología cuántica y creación del universo", por Jonathan J. Halliwell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1992].

La gravedad cuántica euclídea dio un gran salto técnico en los años ochenta y noventa, al poderse efectuar ya por entonces potentes simulaciones computarizadas. En esos modelos informáticos, las geometrías curvas del espaciotiempo se representan por medio de diminutos bloques constituyentes que, por conveniencia, son triangulares. Las mallas triangulares se aproximan muy bien a las superficies curvas; por eso es frecuente que se las emplee en las animaciones por ordenador. En el caso del espaciotiempo, el bloque constituyente elemental es una generalización tetradimensional de los triángulos, el cuadrisímplex. Tal y como pegando triángulos por sus bordes se crea una superficie curva bidimensional, uniendo varios cuadrisímplex por sus "caras" (que son en realidad tetraedros tridimensionales) se crea un espaciotiempo tetradimensional.

Los pequeños bloques constituyentes carecen de significado físico directo y propio. Si pudiéramos examinar el espaciotiempo real con un microscopio ultrapotente, no veríamos pequeños triángulos. No son más que aproximaciones. La única información físicamente relevante proviene del comportamiento colectivo de los bloques constituyentes; se obtiene imaginando que se reducen a un tamaño nulo. En este límite, nada depende de que los bloques fueran triangulares, cúbicos, pentagonales o una mezcla cualquiera de figuras.

La insensibilidad a una variedad de detalles de pequeña escala recibe el nombre de "universalidad". Se trata de un fenómeno harto conocido en la mecánica estadística, o estudio del movimiento molecular en gases y líquidos. Estas sustancias se comportan de manera muy parecida sea cual sea su composición detallada. La universalidad, asociada con las propiedades



TEORIAS DE LA GRAVEDAD CUANTICA

TEORIA DE CUERDAS
Es el enfoque preferido por la mayoría de los físicos teóricos. No sólo es una teoría de la gravedad cuántica, sino también de toda la materia y todas las fuerzas. Se basa en el supuesto de que las partículas (incluida la hipotética que transmite la gravedad) son cuerdas vibrantes.

GRAVEDAD CUANTICA DE BUCLES
Es la principal alternativa a la teoría de las cuerdas. Recurre a una nueva técnica para aplicar las reglas cuánticas a la teoría general de la relatividad de Einstein. El espacio se divide en "átomos" de volumen.

GRAVEDAD CUANTICA EUCLIDEA
Stephen Hawking dio fama a este enfoque. Supone que el espaciotiempo es el promedio cuántico de todas sus conformaciones posibles. El tiempo desempeña el mismo papel que el espacio.

TRIANGULACIONES CAUSALES DINAMICAS
Este enfoque, tema de nuestro artículo, constituye una versión moderna del enfoque euclídeo. Construye una aproximación del espacio con un mosaico de triángulos que incorporan una distinción entre espacio y tiempo. A pequeñas escalas, el espaciotiempo toma una forma fractal.

El espacio: la frontera final

A pesar de que suele concebirse el espacio como un mero vacío, lo mismo aquél que el tiempo tienen una estructura invisible que guía nuestro movimiento (a la manera en que las ondulaciones de la pendiente nevada guían al esquiador). Percibimos esta estructura como fuerza de gravedad. Explicar la forma detallada del espaciotiempo es el principal objetivo de una teoría de la gravedad cuántica.



JEAN-FRANCOIS PODEVIN; KARL WEATHERLY *Corbis* (*esquiador*)

de sistemas de muchas partes que interactúan, se manifiesta a una escala mucho mayor que la de los constituyentes individuales. En la analogía de la bandada de estorninos, el color, tamaño, envergadura y edad de los pájaros integrantes carecen de importancia a la hora de determinar el vuelo global de la bandada. Sólo unos pocos detalles microscópicos se filtran a escala macroscópica.

Un universo que se arruga y encoge

Con esas simulaciones por ordenador, los teóricos de la gravedad cuántica empezaron a explorar los efectos de superponer formas del espaciotiempo que la relatividad clásica no puede manejar; en concreto, las que están muy curvadas en muy pequeñas escalas de distancia. Ese "régimen no perturbativo" es el que más interesa a los físicos, pero resulta inaccesible para los habituales cálculos de lápiz y papel.

Por desgracia, las simulaciones pusieron de manifiesto que a la gravedad cuántica euclídea le falta un ingrediente importante en alguna parte. Encontraron que las superposiciones no perturbativas de universos tetradimensionales son intrínsecamente inestables. Las fluctuaciones cuánticas de la curvatura a cortas escalas, que caracterizan los diferentes universos superpuestos que contribuyen al promedio, no se cancelan entre sí para producir, a grandes escalas, un universo liso, clásico. Muy al contrario, se reforzaban mutuamente, de modo que el espacio se arrugaba hasta convertirse en una pequeña bola con un número infinito de dimensiones. En un espacio tal, media sólo una distancia sutil entre cualquier par arbitrario de puntos, aun cuando el espacio tenga un volumen enorme. En ciertos casos, la conformación del espacio se va al otro extremo: el espacio se vuelve máximamente delgado y extenso, como un polímero químico muy ramificado. Ni lo uno ni lo otro se asemeja, ni de lejos, a nuestro universo.

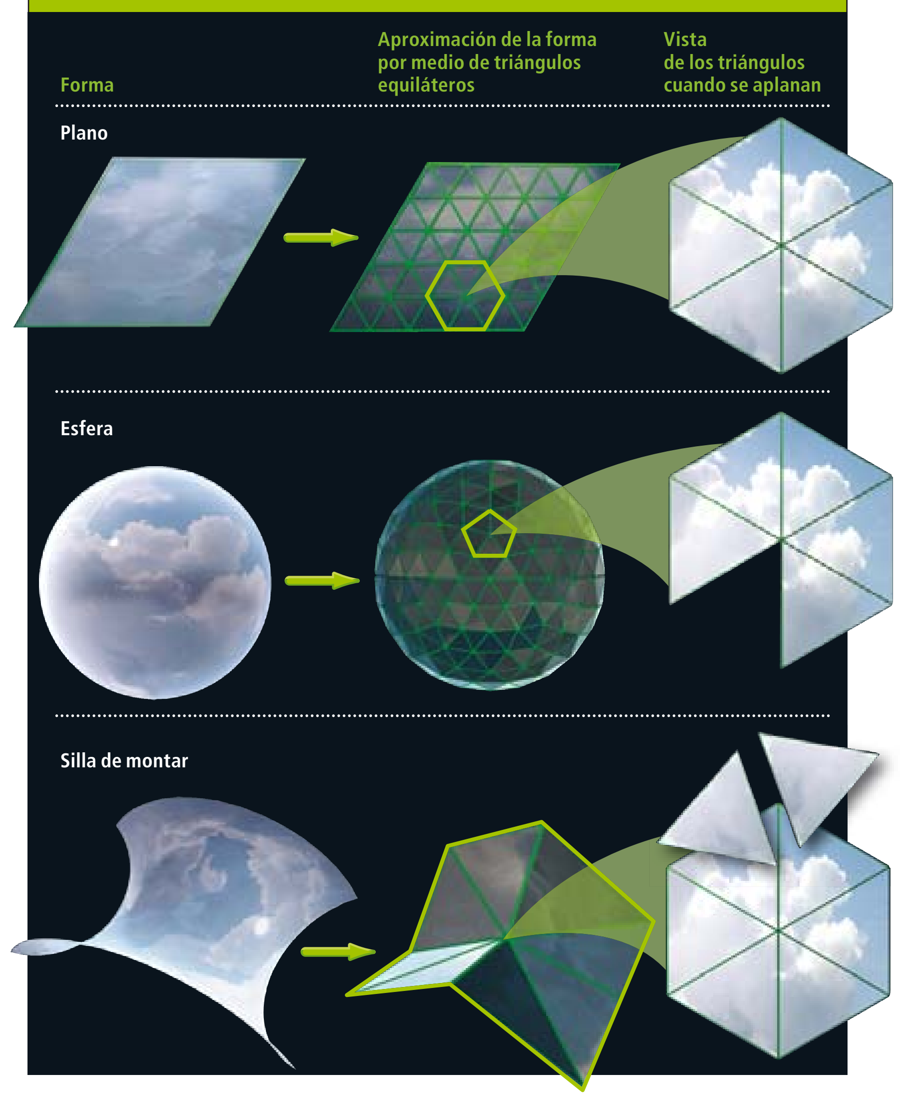
Antes de reexaminar las hipótesis que llevaron a este callejón sin salida, atendamos a un aspecto curioso de este resultado. Los componentes tienen cuatro dimensiones, aunque colectivamente dan lugar a un espacio con un número infinito de dimensiones (el universo arrugado) o con sólo dos (el universo polimérico). Una vez que el genio salió de la botella y se permitió que hubiese grandes fluctuaciones cuánticas del espacio vacío, se tornó mudable hasta el mismo concepto básico de dimensión. No se habría podido prever esta conclusión a partir de la teoría de la gravedad clásica, donde el número de dimensiones siempre viene dado de antemano.

Los aficionados a la ciencia ficción podrían sentirse contrariados con una de las consecuencias. Hay novelas que hacen uso de los "agujeros de gusano", delgadas asas ligadas al universo que proporcionan un acceso directo entre regiones que, si no los hubiera, estarían muy distantes. Los agujeros de gusano resultan apasionantes porque prometen viajes por el tiempo y la transmisión de señales más rápida que la luz. Si bien fenómenos de ese tipo no se han observado nunca, se ha conjeturado que los agujeros de gusano quizás encontrasen justificación dentro de la todavía desconocida teoría de la gravedad cuántica.

En vista de los resultados negativos de las simulaciones por ordenador de la gravedad cuántica euclídea, la viabilidad de los agujeros de gusano parece ahora sumamente improbable. Los agujeros de gusano surgen con tan

Un mosaico de triángulos

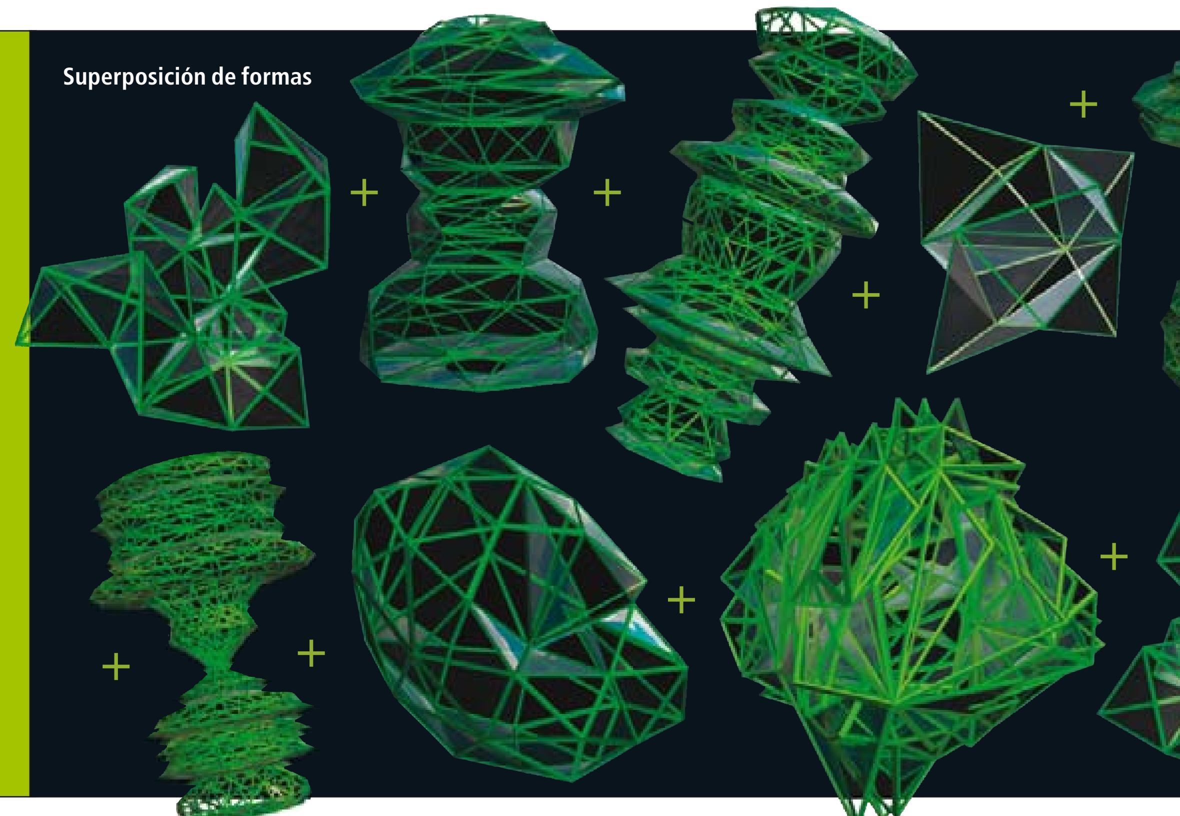
Para determinar de qué modo el espacio se esculpe a sí mismo, primero se necesita describir su forma. Para ello se utilizan triángulos y sus análogos de más dimensiones. Un mosaico de esas piezas puede aproximarse a una forma curvada. La curvatura en un punto se refleja en el ángulo total subtendido por los triángulos que lo rodean. Para una superficie plana, el ángulo es exactamente 360 grados; para superficies curvas, puede ser menos o más.



JEAN-FRANCOIS PODEVIN

Promediando

El espaciotiempo puede tomar un número ingente de formas posibles. De acuerdo con la teoría cuántica, la forma que con mayor probabilidad observaremos es una superposición, o promedio ponderado, de todas esas posibilidades. Cuando se construyen formas con triángulos, se pondera cada forma dependiendo del grado de exactitud con que se pegan los triángulos para engendrarla. Los autores han descubierto que los triángulos deben seguir ciertas normas para que el promedio se ajuste a lo que observamos. En particular, los triángulos deben portar incorporada una flecha del tiempo.



enorme variedad, que tenderían a dominar la superposición y la desestabilizarían, de manera que el universo cuántico nunca crecería más allá del tamaño de un pequeño vecindario, aunque muy interconectado.

¿Dónde está el fallo? En nuestra búsqueda de lagunas y cabos sueltos en el enfoque euclídeo, dimos por fin con la idea fundamental, el ingrediente necesario para que el salteado salga bien: el universo debe incluir lo que los físicos llamamos causalidad; es decir, el espaciotiempo vacío ha de tener una estructura que permita distinguir entre causa y efecto. Es una parte integral de las teorías clásicas de la relatividad especial y general.

La gravedad cuántica euclídea no se basa en una noción de causalidad. El término "euclídeo" indica que el espacio y el tiempo reciben el mismo tratamiento. Los universos que entran en la superposición euclídea tienen cuatro direcciones espaciales, en lugar de una temporal y tres espaciales. Debido a que los universos euclídeos carecen de una noción de tiempo, se ven privados de una estructura que disponga los acontecimientos en un orden específico; esos universos no tienen las palabras "causa" o "efecto" en su vocabulario. Hawking y otros que siguieron este enfoque habían dicho que "el tiempo es imaginario", tanto en un sentido matemático como en el sentido coloquial. Su esperanza era que la causalidad emergería como propiedad a gran escala de fluctuaciones cuánticas microscópicas y desprovistas de estructura causal. Pero las simulaciones por ordenador desvanecieron esa esperanza.

¿QUE ES LA CAUSALIDAD?

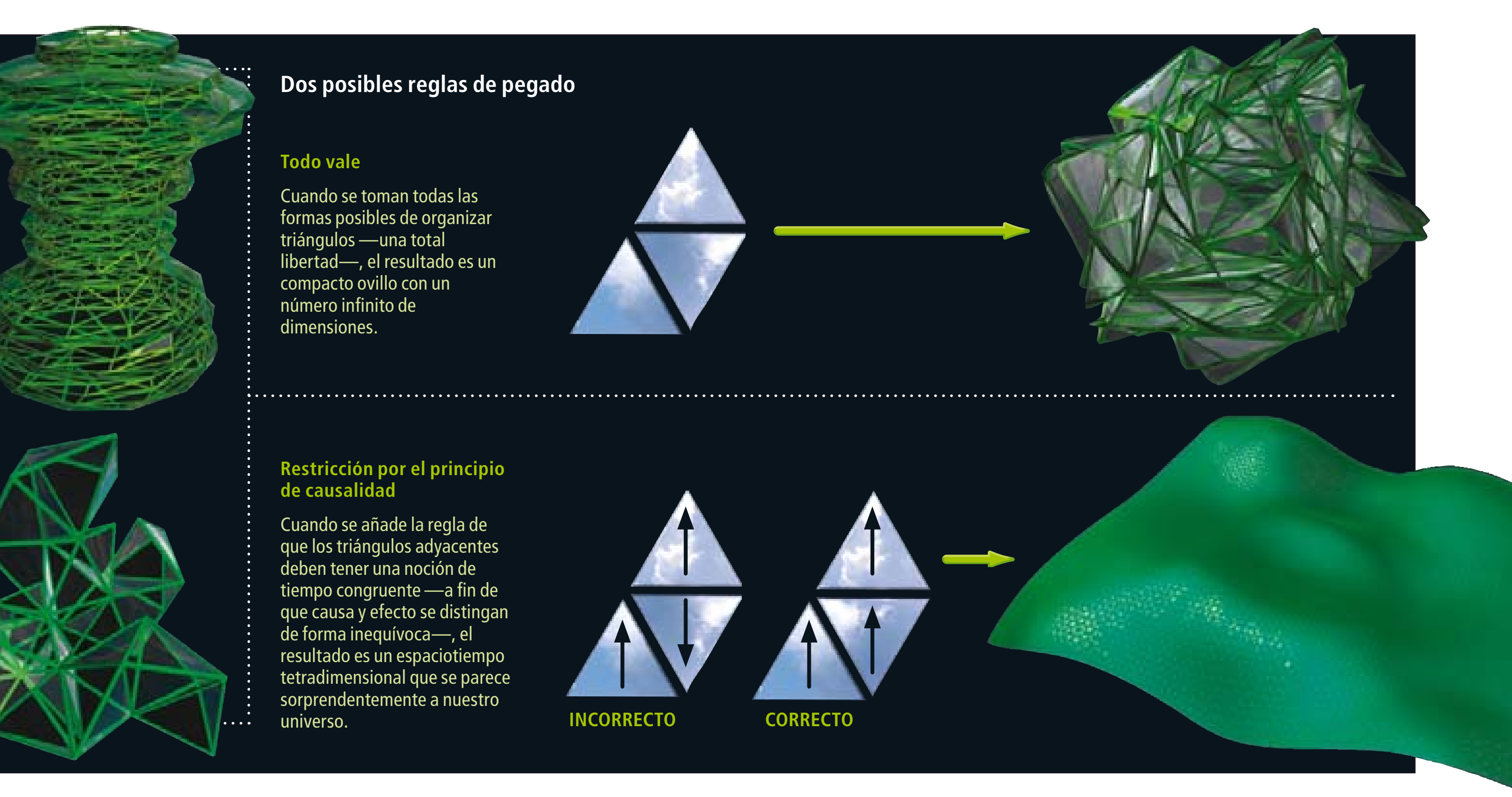
La causalidad es el principio que establece que los acontecimientos ocurren en una secuencia temporal específica de causa y efecto. No ocurren, pues, en un desordenado azar. En el enfoque con el que los autores abordan la gravedad cuántica, la distinción entre causa y efecto es una propiedad fundamental de la naturaleza, no una propiedad deducida.



En lugar de descartar la causalidad al ensamblar los universos individuales y esperar que reaparezca gracias a la sabiduría colectiva de la superposición, decidimos incorporar la estructura causal en una fase mucho más temprana. En nuestro método de las "triangulaciones dinámicas causales", así se le denomina, asignamos primero a cada símplex una flecha del tiempo que apunta desde el pasado hacia el futuro. Luego, hacemos cumplir las normas del pegado causal: dos símplex se deben pegar manteniendo sus flechas apuntando en la misma dirección. Los símplex deben compartir una noción de tiempo, que se desarrolla de manera constante en la dirección de esas flechas y nunca se detiene ni vuelve atrás. El espacio conserva su forma general a medida que el tiempo avanza; no puede romperse en pedazos desconectados o crear agujeros de gusano.

Tras formular esta estrategia en 1998, demostramos con modelos muy simplificados que las reglas del pegado causal dan lugar a una forma a gran escala diferente de la que genera la gravedad cuántica euclídea. Resultaba alentador, pero todavía no demostraba que esas reglas bastaban para estabilizar un universo de cuatro dimensiones. Por eso, estábamos en vilo cuando nuestro ordenador se disponía, en 2004, a arrojar los primeros cálculos de una gran superposición causal de cuadrisímplex. ¿Se comportaría ese espaciotiempo a grandes distancias como un objeto de cuatro dimen-

JEAN-FRANCOIS PODEVIN; IMAGESHOP *Corbis* (*dominó*)



siones extenso y no como una bola arrugada o un polímero?

Imagínese nuestro júbilo cuando el número de dimensiones resultó ser cuatro (más precisamente, 4,02 ± 0,10). Era la primera vez que se deducía el número observado de dimensiones a partir de primeros principios. Hasta el día de hoy, añadir la causalidad en los modelos de gravedad cuántica es la única cura conocida de las inestabilidades de las geometrías de espaciotiempo superpuestas.

Espaciotiempo a lo grande

Esta simulación fue la primera de una serie en marcha de experimentos computacionales en los que tratamos de obtener las propiedades físicas y geométricas del espaciotiempo cuántico con simulaciones por ordenador. Nuestro siguiente paso fue estudiar la forma del espaciotiempo a grandes distancias y verificar que coincide con la realidad, es decir, con las predicciones de la relatividad general. Esta prueba constituye un auténtico reto en modelos no perturbativos de gravedad cuántica, que no presumen una forma predeterminada del espaciotiempo. De hecho, resultan tan difícil, que la mayoría de los intentos de construir la gravedad cuántica —entre ellos la teoría de las cuerdas, excepto en casos especiales— no están lo suficientemente avanzados para lograrlo.

Para que nuestro modelo funcionara, hubimos de incluir desde el principio una constante cosmológica, una entidad invisible e inmaterial que impregna el espacio, incluso en ausencia total de otras formas de materia y energía. Este requisito es una buena noticia, porque las observaciones cosmológicas llevan a creer que existe semejante tipo de energía. Aún más: el espaciotiempo emergente tiene una geometría de De Sitter, la solución de las ecuaciones de Einstein para un universo que no contenga nada más que la constante cosmológica. Es verdaderamente notable que ensamblando bloques constituyentes microscópicos de una manera a todos los efectos aleatoria —sin tener en cuenta ninguna simetría o estructura geométrica preferente—, se obtenga un espaciotiempo que, a grandes escalas, adquiere la forma muy simétrica del universo de De Sitter.

Esta aparición dinámica de un universo de cuatro dimensiones con la forma física correcta a partir de primeros principios es el logro central de nuestro enfoque. La investigación en curso quiere saber si este notable resultado se puede entender en términos de las interacciones de unos aún no identificados "átomos" fundamentales del espaciotiempo.

Una vez convencidos de que nuestro modelo de gravedad cuántica superaba una serie de pruebas clásicas, era el momento de pasar a otro tipo de experimento, que sondeara la estructura cuántica del espaciotiempo que la teoría clásica de Einstein no permite. Una de las simulaciones que hemos realizado es un proceso de difusión: dejamos que un análogo adecuado de una gota de tinta caiga en la superposición de universos para ver cómo se

Los autores

Jan Ambjørn, **Jerzy Jurkiewicz** y **Renate Loll** concibieron su enfoque de la gravedad cuántica en 1998. Ambjørn es miembro de la Real Academia Danesa y profesor del Instituto Niels Bohr de Copenhague y de la Universidad de Utrecht. Jurkiewicz dirige el departamento de teoría de sistemas complejos del Instituto de Física de la Universidad de Cracovia. Entre sus muchos puestos anteriores se incluye uno en el Instituto Niels Bohr. Loll es profesora de la Universidad de Utrecht, donde dirige uno de los mayores grupos de investigación sobre gravedad cuántica de Europa. Previamente trabajó en el Instituto Max Planck de Física Gravitatoria en Golm.

Una nueva dimensión del espacio

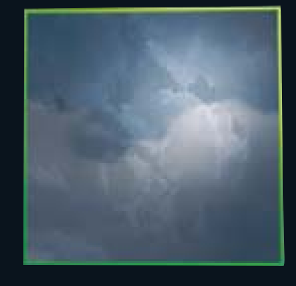
En la vida cotidiana, el número de dimensiones se refiere al número mínimo de mediciones necesarias para precisar la posición de un objeto. Así, la latitud, la longitud y la altitud. Va implícita en esta definición la lisura del espacio, que sigue las leyes de la física clásica.

Pero, ¿qué sucede si el comportamiento del espacio no se ajusta a lo esperado? ¿Qué pasa si su forma está determinada por los procesos cuánticos, donde las nociones usuales no pueden darse por garantizadas? Para estos casos, se requieren nociones de dimensionalidad más refinadas. El número de dimensiones ni siquiera tiene por qué ser un número entero. Es el caso de los patrones fractales, que ofrecen el mismo aspecto en todas las escalas.

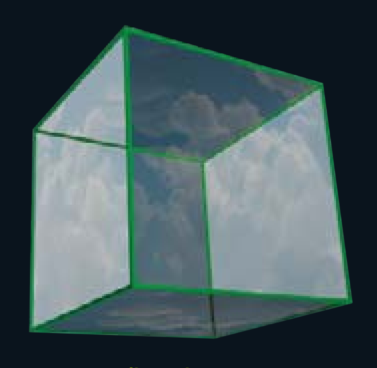
Dimensiones enteras ▼



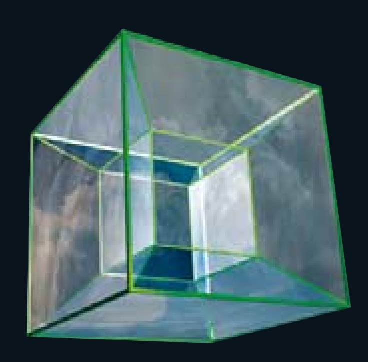
1 dimensión



2 dimensiones



3 dimensiones



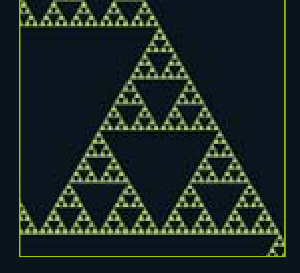
4 dimensiones

Dimensiones fractales ▼



Conjunto de Cantor

Tómese una línea, extráigase el tercio central y repítase la operación hasta el infinito. El fractal resultante es mayor que un punto solitario, pero menor que una línea continua. Su dimensión de Hausdorff (*véase abajo*) es 0,6309.



Triángulo de Sierpiński

Un triángulo del que se extraen subtriángulos de magnitud decreciente es una figura intermedia entre una línea unidimensional y una superficie de dos dimensiones. Su dimensión de Hausdorff es 1,5850.



Esponja de Menger

Un cubo del que se extraen subcubos es un fractal. Este fractal constituye una superficie que parcialmente llena un volumen. Su dimensión de Hausdorff es 2,7268, similar a la del cerebro humano.

Definiciones generalizadas de dimensión

Dimensión de Hausdorff ▼

Esta definición, formulada por el matemático alemán de principios del siglo xx Felix Hausdorff, se basa en la relación de dependencia del volumen V de una región de su tamaño lineal, r. Para el espacio tridimensional ordinario, V es proporcional a r^3. El exponente indica el número de dimensiones. “Volumen” puede remitir a otras medidas del tamaño total, el área, por ejemplo. Para el triángulo de Sierpiński, V es proporcional a $r^{1,5850}$, lo que refleja que esta figura no cubre completamente una superficie.

Dimensión espectral ▼

Esta definición describe cómo se propagan las cosas a través de un medio a lo largo del tiempo, ya se trate de una gota de tinta en un tanque de agua o una enfermedad en una población. Cada molécula de agua, o individuo en la población, tiene un cierto número de vecinos más cercanos. Ese número determina la velocidad a la que la tinta, o la enfermedad, se difunden. En un medio tridimensional, una nube de tinta crece en tamaño como el tiempo elevado a la potencia 3/2. En el triángulo de Sierpiński, la tinta debe filtrarse a través de una forma retorcida, por lo que se propaga más lentamente: como el tiempo elevado a la potencia 0,6826, lo que corresponde a una dimensión espectral de 1,3652.

Uso de las definiciones

Diferentes maneras de calcular el número de dimensiones dan números diferentes, pues no analizan el mismo aspecto de la geometría. Para algunas figuras geométricas, el número de dimensiones no es fijo. Pensemos, a modo de ejemplo, que la difusión puede ser una función más complicada que el tiempo elevado a cierta potencia.

Las simulaciones de la gravedad cuántica se centran en la dimensión espectral. Tales simulaciones imaginan una entidad pequeña que cae en un bloque constituyente del espaciotiempo cuántico. Desde ahí, ese ser camina al azar. El número total de bloques constituyentes del espaciotiempo que toca durante un período determinado revela la dimensión espectral.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

dispersa y cómo las fluctuaciones cuánticas la van llevando de aquí para allá. Midiendo el tamaño de la nube de tinta, al cabo de un cierto tiempo podemos determinar el número de dimensiones del espacio (*véase el recuadro* "Una nueva dimensión del espacio").

El resultado marea: el número de dimensiones depende de la escala. En otras palabras: si dejamos que la difusión avance sólo un breve período de tiempo, el espaciotiempo parece tener un número de dimensiones diferente que cuando la dejamos correr durante mucho tiempo. Ni siquiera quienes nos dedicamos a la gravedad cuántica podemos apenas imaginar cómo el espaciotiempo podría ir cambiando gradualmente de dimensión dependiendo de la resolución del microscopio que lo observe. Está claro que un objeto pequeño experimenta el espaciotiempo de manera completamente diferente de otro grande. Para el objeto pequeño, el universo presenta una suerte de estructura fractal. Un fractal es un extraño tipo de espacio donde el concepto de tamaño no existe. Es sibisemejante: parece el mismo a todas las escalas. No hay reglas, ni otros objetos de un tamaño característico, que puedan servir de patrón de medición.

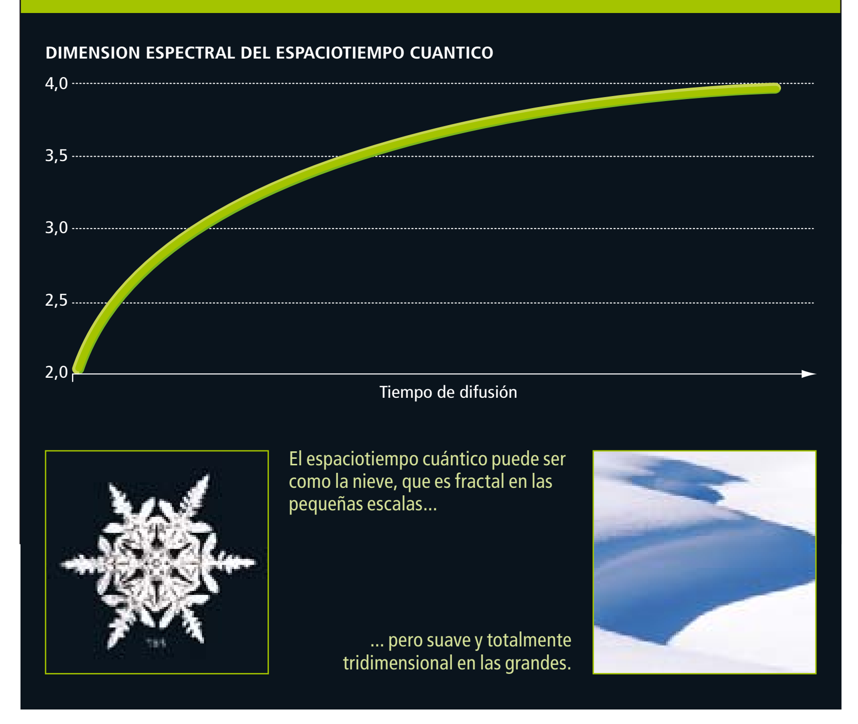
"Pequeño", ¿qué significa ahí? Hasta un tamaño de unos 10^{-34} metros, el universo cuántico está bien descrito por la geometría clásica, tetradimensional, de De Sitter, aunque las fluctuaciones cuánticas van adquiriendo un creciente interés. Que se pueda confiar en la aproximación clásica a distancias tan cortas es bastante sorprendente. Tiene importantes implicaciones para el universo, lo mismo en sus inicios que en un futuro lejano. En ambos extremos, el universo se encuentra vacío a todos los efectos. Al principio, las fluctuaciones cuánticas gravitacionales serían tan enormes, que la materia, balsa minúscula en un océano rugiente, apenas dejaría huella. Dentro de muchos miles de millones de años, la materia, a causa de la rápida expansión del universo, se hallará tan diluida, que, dejará de desempeñar ningún papel. Nuestro método puede explicar la forma del espacio en las dos situaciones.

A escalas aún más cortas, las fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo se hacen tan fuertes, que las nociones intuitivas, clásicas, de la geometría se vienen abajo. El número de dimensiones cae de las clásicas cuatro a un valor de alrededor de dos. Sin embargo, en la medida en que podemos saberlo, el espaciotiempo sigue siendo continuo, sin agujeros de gusano. No es tan salvaje como el físico John Wheeler y muchos otros imaginaban: no es una burbujeante espuma de espaciotiempo. La geometría del espaciotiempo obedece normas que no son clásicas, que no son comunes, pero el concepto de distancia sigue siendo válido. Nos encontramos ahora en proceso de sondear escalas aún más finas. Una posibilidad es que el universo se convierta en sibisemejante y parezca el mismo a todas las escalas por debajo de cierto umbral. Si es así, el espaciotiempo no consistirá en cuerdas o en átomos de espaciotiempo, sino en un infinito aburrimiento: la estructura que se observe justo por debajo del umbral simplemente se repetirá a sí misma en escalas cada vez más pequeñas, *ad infinitum*.

Es difícil imaginar cómo los físicos podrían salir adelante con menos ingredientes y herramientas técnicas que las que hemos utilizado para crear un universo cuántico con propiedades realistas. Todavía tenemos que realizar muchas pruebas y experimentos; por ejemplo, para entender cómo se comporta la materia en el universo y cómo, a su vez, influye en la forma global del universo. La meta final, de nuestra teoría y de cualquier otra que aspire a describir la gravedad cuántica, es la predicción de consecuencias observables deducidas de la estructura cuántica microscópica. Este será el criterio último para decidir si nuestro modelo es, realmente, la teoría correcta de la gravedad cuántica.

Al ampliar el espaciotiempo

Según los cálculos de los autores, la dimensión espectral del espaciotiempo pasa de cuatro (a grandes escalas) a dos (a pequeñas escalas); el espaciotiempo, de continuo suave, se convierte en un complejo fractal. No se sabe aún si esta conclusión significa que el espaciotiempo se compone de "átomos" localizados o que está formado por complicados patrones que guardan muy poca relación con los conceptos geométricos comunes.



LUCY READING-IKKANDA; NOAA/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*copo de nieve*); TERRY W. EGGERS *Corbis* (*banco de nieve*)

Bibliografía complementaria

DERIVING DIMENSIONS. Adrian Cho en *Physical Review Focus*; 28 de septiembre, 2004.

PLANCKIAN BIRTH OF A QUANTUM DE SITTER UNIVERSE. J. Ambjørn, A. Görlich, J. Jurkiewicz y R. Loll en *Physical Review Letters*, vol. 100, artículo n.º 091304; 7 de marzo, 2008.

THE COMPLETE IDIOT'S GUIDE TO STRING THEORY. George Musser. Alpha, 2008.

THE EMERGENCE OF SPACETIME, OR, QUANTUM GRAVITY ON YOUR DESKTOP. R. Loll en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 25, n.º 114.006; 7 de junio, 2008.

Función biológica de las chaperonas

Desde hace tiempo se sabe que las proteínas de choque térmico nos protegen del estrés. Ahora se les atribuye otras funciones en el cáncer y en la inmunidad

PRAMOD K. SRIVASTAVA

En 1962, en el Instituto de Genética de Pavía alguien subió la temperatura de un incubador que contenía moscas de la fruta. Al examinar las células de las moscas sometidas al "choque térmico", descubrieron que los cromosomas se habían ensanchado en ciertas regiones. El aspecto expandido constituía un claro indicio de que se estaban activando ciertos genes para que diesen lugar a las proteínas que codificaban. Esas regiones activas acabaron denominándose *loci* (lugares) de choque térmico.

En un principio se creyó que se daba sólo en la mosca de la fruta. Se necesitaron otros 15 años para que las proteínas originadas tras la aparición de esas expansiones cromosómicas se detectaran en mamíferos y en otros organismos. Desde entonces, en lo que ha venido a ser una de las historias más fascinantes de la biología contemporánea, se ha terminado por reconocer que las proteínas de choque térmico (HSP, de "heat shock protein") desempeñan una función crucial en *todas* las formas de vida, a escala celular, somática y poblacional.

Estas moléculas ubicuas representan uno de los mecanismos de supervivencia más antiguos que se han conservado a lo largo de la evolución. Es más, se ha demostrado que facilitan la evolución. Fabricadas en respuesta a condiciones estresantes (entre otras el calor), las HSP ayudan a que las células sobrelleven el estrés y permiten que los procesos celulares se mantengan operativos en condiciones adversas. Durante el último decenio, se ha descubierto que las HSP desempeñan también otras funciones en organismos superiores, incluidos los humanos: forman parte de nuestras defensas inmunitarias contra el cáncer y los patógenos. Podrían, por tanto, ser de gran valor para el desarrollo de medicamentos y vacunas.

Para sacar a la luz el potencial terapéutico de proteínas tan versátiles, resulta útil echar un vistazo a las formas en que desempeñan su tarea principal, que consiste en operar a modo de "chaperonas" para otras proteínas. Al igual que las personas que actúan de chaperonas (damas de compañía, carabinas), el trabajo de las HSP se centra en dos objetivos: inhibir las interacciones no deseadas y promover las deseables, de modo que se establezca un vínculo estable y productivo entre parejas de proteínas.

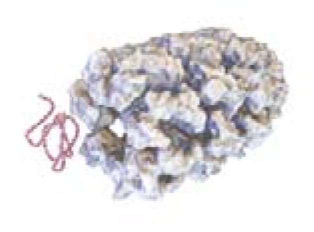
CONCEPTOS BASICOS

- Las chaperonas se encuentran en todos los organismos. Desarrollan una función protectora y se encargan del mantenimiento de una amplia gama de procesos celulares.
- Mediante múltiples interacciones, estas proteínas van recogiendo "huellas" que revelan el contenido de cada célula. Han desempeñado, en el curso de la evolución, un papel fundamental en la respuesta inmunitaria frente al cáncer o patógenos.
- Se están desarrollando varios fármacos basados en la inhibición o la potenciación de las chaperonas.

Escoltas versátiles

Con frecuencia, las proteínas del interior de una célula cuentan sólo con una o dos "socias" con las que interactúan de modo eficaz. Pensemos en el receptor y su ligando, que operan a modo de cerradura y llave, respectivamente. El ligando provoca efectos limitados en otros tipos de receptores; el receptor es activado sólo por su ligando o por moléculas que guardan una estrecha semejanza estructural con éste. Por contra, las HSP tienden a asociarse con una gama más amplia de "clientes" proteicos, lo que les permite desempeñar una amplia variedad de tareas: ayudar a que las cadenas de aminoácidos recién sintetizadas se plieguen con la forma proteínica adecuada, desmantelarlas cuando han resultado dañadas, acompañar a las proteínas hasta sus "socias" y mantenerlas alejadas de intrusos.

La capacidad de una proteína para cumplir la misión asignada depende no sólo de que se encuentre en el lugar preciso en el momento adecuado, sino también de que adopte la forma correcta. Las cadenas de aminoácidos recién formadas se hallan sometidas a fuerzas que las ayudan a adquirir la configuración correcta. En el citoplasma celular cada aminoácido presenta una respuesta característica frente al agua. Los aminoácidos hidrofóbicos "aborrecen" el agua e intentan alejarse de la misma refugiándose





en el interior de la proteína; los aminoácidos hidrofílicos, en cambio, prefieren estar orientados hacia el exterior. Sin embargo, estos mecanismos no siempre resultan suficientes para asegurar el correcto plegamiento de la proteína. En ese contexto entran en acción proteínas de choque térmico, como la HSP60.

Arthur L. Horwich ha aportado la mayor parte de la información disponible sobre la chaperona HSP60, que crea una figura en jaula mediante varias moléculas de HSP60. Su borde interior es muy hidrofóbico; atrae, por tanto, a los aminoácidos hidrofóbicos expuestos en una proteína desplegada para que se le unan. Cuando una cadena de ese tipo se introduce en la jaula de HSP60, se encuentra con un interior hidrofílico que los aminoácidos hidrofóbicos tratan de evitar a toda costa; la molécula atrapada se ve entonces forzada a cambiar de forma. Este proceso puede fracasar en un primer intento; la jaula puede liberar y volver a capturar a la proteína varias veces antes de que la proteína adquiera la conformación plegada correcta. De ahí que a HSP60 se la denomine foldasa (de "fold", plegar en inglés). Por contra, HSP100 corresponde a una desfoldasa; consta también de un anillo formado por varias subunidades. Junto con HSP70, disgrega proteínas dañadas o agregados proteicos indeseados; puede hacer incluso que una proteína se despliegue.

A diferencia de las chaperonas en jaula, la mayoría de las HSP no encierran a sus sustratos sino que los "toman del brazo" para irlos guiando. HSP70 se une a segmentos cortos de la secuencia aminoacídica (péptidos). La molécula posee una hendidura para la unión a péptidos que se encuentra abierta cuando HSP70 está unida al ATP (fuente de energía celular); pero, en ausencia de ATP, una estructura de la HSP70 con forma de tapadera emprende medidas drásticas contra el péptido unido, acomodando el resto de la cadena proteica en ese lugar. La capacidad de HSP70 para atrapar a diversos péptidos le permite desempeñar la función de chaperona en multitud de procesos fundamentales para la célula: ayuda a las nuevas cadenas de aminoácidos a adoptar una conformación madura, facilita el ensamblaje de proteínas complejas y evita la degradación de proteínas a temperaturas elevadas.

LAS PROTEINAS DE CHOQUE TERMICO corresponden a chaperonas celulares que velan por la integridad de las proteínas. Les ayudan a adquirir y mantener la forma apropiada, las conducen a los lugares adecuados y las protegen contra interacciones indeseadas.

JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*

Las proteínas de choque térmico operan en condiciones normales. Pero su ayuda resulta más valiosa todavía cuando la célula debe afrontar una situación estresante. En condiciones de emergencia (calor o frío extremos, anoxia, deshidratación o inanición), una célula se las ve y se las desea para sobrevivir. El ambiente extremo podría degradar las proteínas fundamentales, aunque la célula tratara de fabricar los repuestos. En esas condiciones, las proteínas de choque térmico aliviarían el estrés mediante la recuperación de proteínas esenciales, la degradación y reciclado de proteínas dañadas y el mantenimiento de los procesos celulares.

Por tanto, cuando una célula se halla sometida a un estrés intenso, una de sus primeras respuestas consistirá en fabricar mayor número de copias de las HSP. Eso es precisamente lo que se observó en Pavía hace 46 años. A partir de ese descubrimiento, se intensificó la investigación sobre la función básica de las HSP [*véase* "Respuesta de las células al estrés", por William J. Welch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1993]. Sin embargo, al principio del decenio de los ochenta empezó a descubrirse una función de las HSP completamente distinta, aunque de interés parejo, para la supervivencia de los organismos superiores.

Huellas antigénicas

A principios de los años ochenta del siglo pasado me interesé por un fenómeno que se venía observando desde los años cuarenta, sin haber recibido todavía la debida explicación. Se había demostrado que se podía inmunizar a roedores contra sus propios cánceres, del mismo modo en que, de manera rutinaria, se inmunizaba a los humanos frente a patógenos. Sin embargo, mientras las proteínas de un patógeno operan a modo de antígenos (provocan una respuesta inmunitaria), porque son extrañas para el sistema inmunitario del mamífero, el cáncer está constituido por células del propio individuo. ¿Cuál era entonces el elemento antigénico tumoral?

Comencé por tratar de aislar los antígenos específicos del cáncer. Identifiqué una proteína, la gp96, que inducía resistencia inmunitaria a los tumores. Para sorpresa de todos, la molécula de marras resultó ser un miembro de la familia HSP70 (numerosas proteínas HSP se presentan de varias formas emparentadas), que se aloja en tejidos normales y en células cancerosas.

Dos años más tarde, Stephen J. Ullrich y sus colaboradores realizaron una observación similar. Las moléculas gp96 encontradas en tumores y en tejidos normales evidenciaban secuencias de aminoácidos idénticas, de modo que las gp96 presentes en el cáncer no eran específicas del cáncer. ¿Cuál era entonces el motivo de su capacidad para inmunizar frente a esa enfermedad?

La respuesta llegó en 1990, cuando con Heiichiro Udono estábamos aislando HSP70 de los tumores para comprobar si esta proteína confería también inmunidad frente a los tumores. Descubrimos que sí. Pero la sorpresa mayor llegó cuando sometimos a HSP70 a una cromatografía de afinidad hacia el ATP (etapa final de una purificación): desapareció la potente actividad inmunizadora de la molécula.

Nos dimos cuenta enseguida de que la exposición de HSP70 al ATP estaba haciendo que HSP70 perdiese material, que resultaron ser péptidos. Durante los años siguientes se ha demostrado que HSP70 cambia de conformación cuando se une al ATP, haciendo que se desprenda de cualquier péptido que lleve unido. Se descubrió que todos los miembros de las familias HSP60, HSP70 y HSP90 solían llevar consigo péptidos generados en el interior de las células. Y cuando HSP70 o HSP90 proceden de un cáncer o de células infectadas por virus o por la tuberculosis, en casi todos los casos contienen péptidos procedentes de los antígenos específicos del cáncer, de los antígenos víricos o de los antígenos de la tuberculosis. Los péptidos asociados a las HSP constituyen, por tanto, la "huella antigénica" de las células o tejidos de donde proceden.

Esa capacidad de ciertas chaperonas de retener péptidos representativos de las células donde se han originado otorga a las HSP un papel esencial en uno de los procesos principales del sistema inmunitario: el reconocimiento de las células cancerosas y de las células infectadas por virus. Los linfocitos T reconocen los antígenos de esas células mediante un complejo proceso de "presentación de antígenos". Todos los antígenos fabricados en el interior de las células se degradan y generan péptidos que posteriormente se asocian a proteínas HSP pertenecientes a las familias HSP60, HSP70 y HSP90 mediante una serie de sucesos que aún no está del todo clara. En última instancia, los péptidos se unen a las "proteínas del complejo principal de histocompatibilidad de tipo I" (MHCI), un tipo especial de proteínas que se alojan en la superficie de la mayoría de las células de mamífero. Las células T reconocen esos complejos MHCI-péptidos y destruyen a todos los que indiquen que la célula está enferma.

El que los péptidos vayan acompañados de las chaperonas HSP resulta esencial para que acaben uniéndose a las moléculas de MHCI; cuando las HSP se encuentran químicamente inutilizadas, las moléculas de MHCI permanecen vacías (sin péptidos unidos) y no pueden ser reconocidas por las células T. En 1994, mis colaboradores y yo propusimos esa función de



RESPUESTA AL ESTRES

Los cromosomas de una mosca de la fruta expuesta a un calor intenso muestran un aspecto "expandido" en las regiones que contienen los genes codificadores de las proteínas de choque térmico (*blanco* y *verde*). Para que una célula fabrique esas proteínas, el ADN, compactado, debe desenrollarse ligeramente y así dejar accesibles los genes correspondientes; eso es lo que provoca el aspecto ensanchado de esas regiones.

CORTESIA DE J. WERNER Y J. T. LIS EN *SCIENCE*, VOL. 301; AGOSTO DE 2003

Los autores

Pramod K. Srivastava, profesor de medicina, dirige el centro de inmunoterapia contra el cáncer y enfermedades infecciosas de la facultad de medicina de la Universidad de Connecticut. Su campo de investigación abarca la función inmunitaria de las proteínas de choque térmico (HSP). Es asesor y miembro fundador de Antigenics, compañía dedicada al desarrollo de vacunas contra el cáncer a partir de HSP de células tumorales.

los péptidos unidos a HSP en la presentación de antígenos por parte de las moléculas MHC. Con nuestro trabajo y el de otros grupos, quedó demostrada la validez de la hipótesis propuesta.

La capacidad de que gozan las HSP unidas a péptidos de acompañar a los antígenos explica la capacidad evidenciada por las HSP procedentes de tumores o de células infectadas por patógenos de inmunizar contra esos mismos tumores o patógenos intracelulares. Pero los complejos HSP-péptido desempeñan también otra tarea fundamental en el reconocimiento por parte de las células T de los antígenos amigos o enemigos; función ésta que ejecutan mediante la interacción con distintos tipos de células inmunitarias denominadas células presentadoras de antígenos.

Disparar la alarma

En calidad de centinelas del sistema inmunitario, encontramos células presentadoras de antígenos en casi todos los tejidos del organismo, donde "toman muestras" de su entorno en busca de cualquier antígeno que pueda rondar por allí. Todo lo que van hallando lo presentan a las células T, que, en última instancia, se lanzarán al ataque e intentarán destruir las células cancerosas o infectadas.

Las células presentadoras de antígenos alojan en la superficie receptores para las chaperonas que se unen a péptidos. El primero de esos receptores fue identificado por Robert J. Binder. Lo denominó CD91. Cuando las células se encuentran con un complejo HSP-péptido, lo introducen en su interior a través de CD91 y presentan a las células T los péptidos que van unidos a la HSP; por fin, las células T se multiplican para luchar contra el cáncer o contra el patógeno. Ese mecanismo explica que las HSP procedentes de un cáncer tengan capacidad de inmunizar contra el cáncer, de la que carecen las HSP procedentes de tejidos normales.

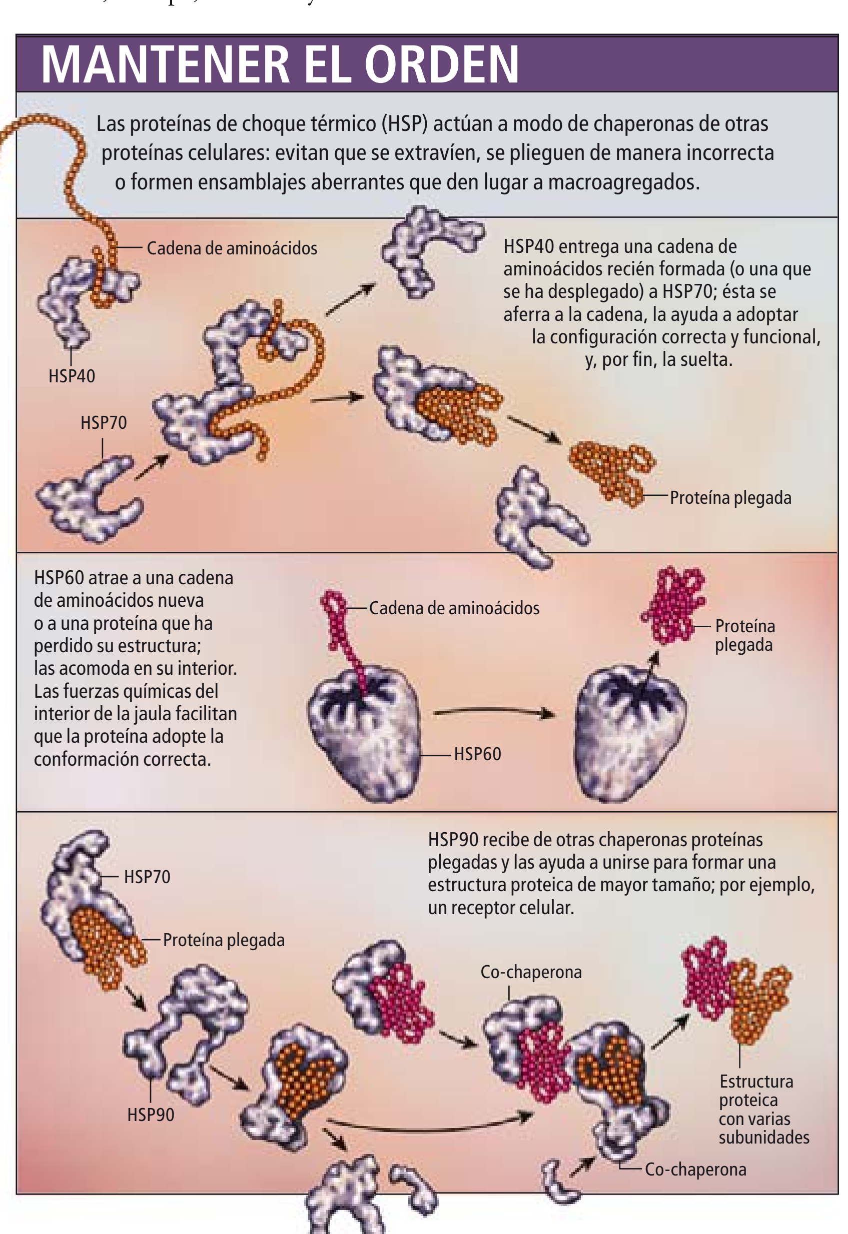
Además de ofrecer al sistema inmunitario una descripción del invasor, las HSP hacen saltar algún tipo de alarma. Sreyashi Basu y yo hemos demostrado que la exposición de las células presentadoras de antígenos a miembros de las familias HSP70 y HSP90 provoca en las células una serie de cambios, entre los que se incluye la iniciación de señales que provocan inflamación, proceso característico de una intensa defensa inmunitaria. Aunque las HSP suelen operar en el interior celular, en condiciones de estrés se libera o expone en la superficie celular una cantidad limitada —aunque significativa— de HSP. Por tanto, la capacidad de las HSP para activar, mediante su mera presencia, a las células presentadoras de antígenos sugiere que una localización anómala de las HSP en el exterior de la célula puede corresponder a un mecanismo para alertar al sistema inmunitario de un peligro.

Mi interés en la utilización de complejos HSP-péptido purificados a partir de cánceres para inducir un rechazo al tumor se basa en esa función inmunizadora y en el supuesto de que el tumor de cada paciente es único desde el punto de vista de los antígenos. He desarrollado un método para la extracción, a partir de un paciente concreto, de péptidos unidos a HSP y su posterior reintroducción en una forma purificada a modo de vacuna. Se trata de estimular al sistema inmunitario para que ataque a las células portadoras de esos antígenos tumorales específicos.

La estrategia se ha ensayado en los EE.UU. y en Europa en una serie de pruebas clínicas preliminares (fase I y fase II) realizadas con humanos y para varios tipos de cáncer. En EE.UU., Europa, Australia y Rusia acaban de

MANTENER EL ORDEN

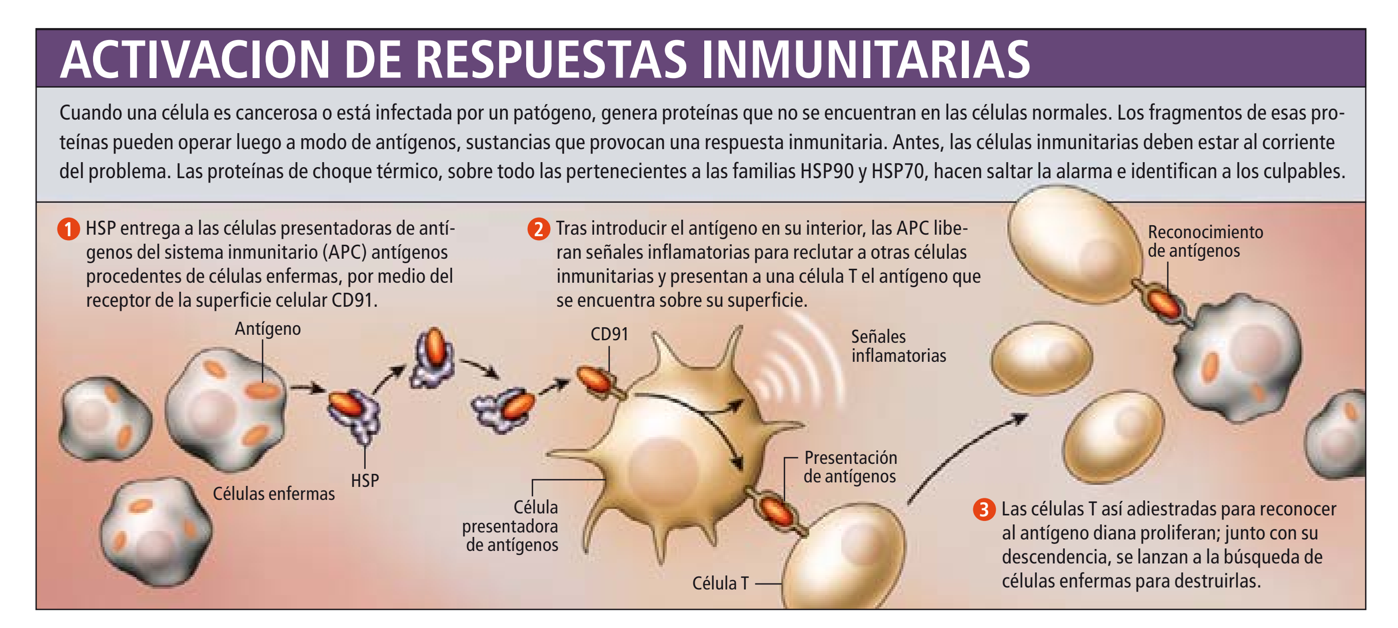
Las proteínas de choque térmico (HSP) actúan a modo de chaperonas de otras proteínas celulares: evitan que se extravíen, se plieguen de manera incorrecta o formen ensamblajes aberrantes que den lugar a macroagregados.



JEN CHRISTIANSEN

ACTIVACION DE RESPUESTAS INMUNITARIAS

Cuando una célula es cancerosa o está infectada por un patógeno, genera proteínas que no se encuentran en las células normales. Los fragmentos de esas proteínas pueden operar luego a modo de antígenos, sustancias que provocan una respuesta inmunitaria. Antes, las células inmunitarias deben estar al corriente del problema. Las proteínas de choque térmico, sobre todo las pertenecientes a las familias HSP90 y HSP70, hacen saltar la alarma e identifican a los culpables.



concluir unas pruebas de eficacia más avanzadas (ensayos aleatorios en fase III) en pacientes con melanoma y con cáncer de riñón. Los últimos estudios citados demostraron que los pacientes con melanoma que recibieron dosis suficientes de la vacuna con complejos HSP-péptido y cuya enfermedad se limitaba a la piel, ganglios linfáticos y pulmones vivieron un período de tiempo más prolongado que los pacientes que recibieron otros tratamientos estándar, entre ellos quimioterapia. En el ensayo con cánceres renales, en algunos pacientes la vacuna alargó en más de un año y medio el período asintomático (sin recidivas).

Los resultados reseñados bastaron para que el gobierno ruso aprobase el tratamiento, convirtiéndolo en la primera aplicación clínica de una vacuna contra el cáncer. En breve se presentará una solicitud para que se apruebe en Europa; la solicitud a la Agencia Federal de Fármacos y Medicamentos de los EE.UU. está a la espera de que se obtengan más datos sobre la evolución a largo plazo de los pacientes. Mientras tanto, parece que esa estrategia podría resultar eficaz también para el tratamiento del herpes genital, la tuberculosis y otras enfermedades infecciosas graves. Se están llevando a cabo ensayos clínicos para investigar tales aplicaciones.

Amplia influencia

Amplificar el efecto natural de las HSP sobre el sistema inmunitario utilizándolas en vacunas no constituye la única aplicación terapéutica de estas proteínas tan versátiles. El trabajo de Suzanne L. Rutherford y Susan L. Lindquist ha proporcionado un ejemplo sorprendente de la eficacia con que las HSP desempeñan su tarea fundamental: a saber, mitigar los efectos del estrés celular. Han demostrado que la supresión de la actividad de HSP90 en moscas de la fruta pone de manifiesto un abanico entero de mutaciones genéticas ocultas. De donde se desprende que HSP90 estaba amortiguando posibles efectos deletéreos.

Según Rutherford y Lindquist, existe en la naturaleza una amplia variabilidad genética que afectaría al funcionamiento de los organismos, si no fuera porque HSP90 impide que se ponga de manifiesto, un efecto que fomenta la acumulación silenciosa de cambios génicos. Cuando esa función de amortiguación se ve comprometida (por temperaturas extremas, por ejemplo), surgen los rasgos que han sufrido variaciones y la selección natural opera sobre ellos. Al fomentar la variabilidad genética, HSP90 potencia, por tanto, la evolución.

Lindquist y sus colaboradores han aportado pruebas adicionales de la función de HSP90 en la rápida evolución de rasgos novedosos; entre otras, la resistencia a determinados fármacos en varias especies de hongos. A partir de esos resultados, han sugerido que los inhibidores de HSP90 específicos de especie podrían utilizarse como antibióticos de nueva generación. De forma análoga, se cree que las HSP amortiguan la acumulación de mutaciones que restarían viabilidad a las células cancerosas y, por contra, potenciarían su tumoricidad. Puesto que HSP90 afecta a una gama más amplia de rutas de señalización intracelular que cualquier otra proteína HSP, la pérdida de su función aumentaría la sensibilidad de las células cancerosas al estrés, lo que facilitaría su eliminación mediante quimioterapia. En pacientes con cáncer, se están ensayando, junto con quimioterapia, fármacos inhibidores de HSP90 cada vez más específicos.

Mientras estaba ensayando la eficacia de los complejos HSP-péptido en la inmunote-

ESTRES BENEFICIOSO

El ejercicio eleva la temperatura del organismo y genera otras formas de estrés en las células, con la consiguiente síntesis estimulada de determinadas proteínas de choque térmico. Estas podrían contribuir a los efectos beneficiosos del ejercicio mediante la mitigación de los daños en el interior de las células y las señales de alerta al sistema inmunitario para que emprenda respuestas inmunitarias.



JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); ANTHONY WEST *Corbis* (*fotografía*)

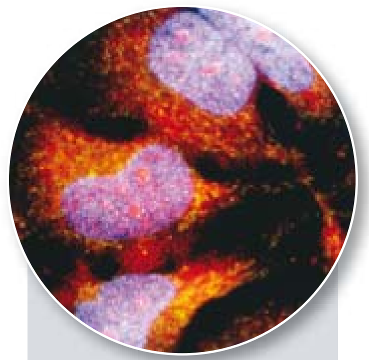
rapia contra el cáncer, me llamó la atención un fenómeno en apariencia extraño: las dosis elevadas de HSP no inducían inmunidad, sino que provocaban la supresión de la respuesta inmunitaria. Esos trabajos, emprendidos con Rajiv Chandawarkar, del hospital clínico de la Universidad de Connecticut, demostraron la doble función de HSP: inmunoestimuladora e inmunosupresora.

Mediante investigaciones sobre ratones, demostramos que las dosis elevadas de HSP suprimían la diabetes autoinmunitaria de tipo 1 y la encefalitis. Irun R. Cohen y sus colaboradores, del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, vienen defendiendo desde hace tiempo la hipótesis de que HSP60 y uno de sus péptidos son autoantígenos en la diabetes humana de tipo 1: desencadenan un ataque inmunitario sobre las células que producen insulina en el propio organismo. Han demostrado en pruebas clínicas cierta eficacia del bloqueo del péptido. Se están llevando a cabo ensayos más avanzados con humanos.

Aunque las funciones de las HSP las convierten en agentes atractivos para el tratamiento de diversas enfermedades, su propia universalidad supone un peligro. Los fármacos diseñados para alterar la concentración de las HSP corren el riesgo de dañar a un gran número de sistemas del organismo que dependen de estas proteínas. Pero existen numerosos antecedentes en la historia del desarrollo de fármacos en los que se ha logrado modular proteínas esenciales sin provocar efectos secundarios inaceptables. A su debido tiempo, las HSP entrarán en un número creciente de aplicaciones clínicas.

Desde una perspectiva más general, estas moléculas, primitivas y abundantes, han persistido desde el origen de la vida en virtud de su necesidad para crear la infraestructura biológica básica tal y como la conocemos. Se requerían para subvenir a la síntesis de proteínas, facilitar la degradación proteica, resguardar las proteínas del estrés del entorno primigenio y proteger a las células de los efectos perjudiciales de las mutaciones.

A medida que fueron surgiendo nuevas funciones biológicas, como la inmunidad, el proceso evolutivo recurrió a lo que ya disponía en abundancia, y así se sirvió de las HSP para la presentación de antígenos. Dudo que estemos cerca de haber explorado por completo el repertorio de actividades de unas moléculas tan polifacéticas. Conforme profundicemos en el funcionamiento de la vida irán descubriéndose, sin duda, funciones inéditas e insospechadas de las diligentes chaperonas.



AYUDANTES PERJUDICIALES

Las células cancerosas, al ser anormales, se encuentran la mayor parte del tiempo sometidas a estrés, por cuyo motivo generan mayor cantidad de proteínas de choque térmico. Se cree que HSP90 (*amarillo*) ayuda a las células cancerosas a sobrevivir en condiciones estresantes, tal y como ocurre en las células normales. Mediante la inhibición de HSP90 podría hacerse que las células malignas se tornaran más sensibles a la quimioterapia.

ENSAYOS CLINICOS EN MARCHA

Varios medicamentos todavía en desarrollo se fundan en las múltiples funciones que desempeñan las proteínas de choque térmico. Algunos inhiben las proteínas y otros las activan, en función de la enfermedad que combaten y de la HSP que utilizan o contra la que se dirigen.

ESTRATEGIA TERAPEUTICA

- 🔴 **Inhibición de las HSP** Se administran sustancias bloqueadoras de las HSP que, en condiciones normales, ayudarían a que una célula cancerosa, una célula infectada por un virus o una bacteria patógena sobrevivieran
- 🟢 **Inducción de las HSP** Mediante calor o sustancias químicas se induce que las HSP de un paciente protejan a un órgano durante tratamientos quirúrgicos o de otro tipo
- 🔵 **Vacunas/Inmunoterapia** Se purifican complejos HSP-péptido antigénicos que se introducen luego en el organismo para desencadenar una respuesta inmunitaria frente a un tumor o un patógeno

**Aprobado en Rusia para su uso clínico*

HSP	TRATAMIENTO (FABRICANTE)	ENFERMEDAD
HSP90	🔴 Alvespimicina (Kosan Biosciences)	Cáncer de mama
	🔴 Tanespimicina (Kosan Biosciences)	Leucemia, linfoma, tumores sólidos
	🔴 NF 2024 (Biogen Idec)	
	🔴 SNX-5422 mesilato	
	🔴 AUY-922 (Novartis)	Tumores sólidos
	🔴 IPI-504 (Infinity Pharmaceuticals)	Melanoma, cáncer de próstata
	🔴 BIIB021 (Biogen Idec)	Leucemia, linfoma, tumores sólidos
HSP27	🔴 OGX-427 (OncoGenex Tecnologies)	Tumores sólidos
Varias	🟢 Radioterapia	Melanoma
HSP65	🔵 HspE7 (Nventa Biopharmaceuticals)	Células del cuello del útero precancerosas infectadas con papilomavirus humano
HSP70	🔵 AG-707 (Antigenics)	Herpex simplex de tipo 2
	🔵 HSPPC-70/AG-858 (Antigenics)	Leucemia mieloide crónica
Gp96	🔵 HSPPC-96/vitespen* (Antigenics)	Tumores sólidos

NANCY KEDERSHA *Photo Researchers, Inc. (micrografía)*

Bibliografía complementaria

ROLES OF HEAT-SHOCK PROTEINS IN INNATE AND ADAPTIVE IMMUNITY. Pramod K. Srivastava en *Nature Reviews Immunology*, vol. 2, n.º 3, págs. 185-194; marzo de 2002.

HSP90 AND THE CHAPERONING OF CANCER. Luke Whitesell y Susan L. Lindquist en *Nature Reviews Cancer*, vol. 5, n.º 10, págs. 761-772; octubre de 2005.

HEAT SHOCK FACTOR 1 IS A POWERFUL MULTIFACETED MODIFIER OF CARCINOGENESIS. Chengkai Dai y col. en *Cell*, vol. 130, n.º 6, págs. 1005-1018; 21 de septiembre de 2007.

PHASE III COMPARISON OF VITESPEN, AN AUTOLOGOUS TUMOR DERIVED HEAT SHOCK PROTEIN GP96 PEPTIDE COMPLEX VACCINE, WITH PHYSICIAN'S CHOICE OF TREATMENT FOR STAGE IV MELANOMA: THE C-100-21 STUDY GROUP. Alessandro Testori y col. en *Journal of Clinical Oncology*, vol. 26, n.º 6, págs. 955-962; 20 de febrero de 2008.

Paisaje submarino en un pinar mediterráneo

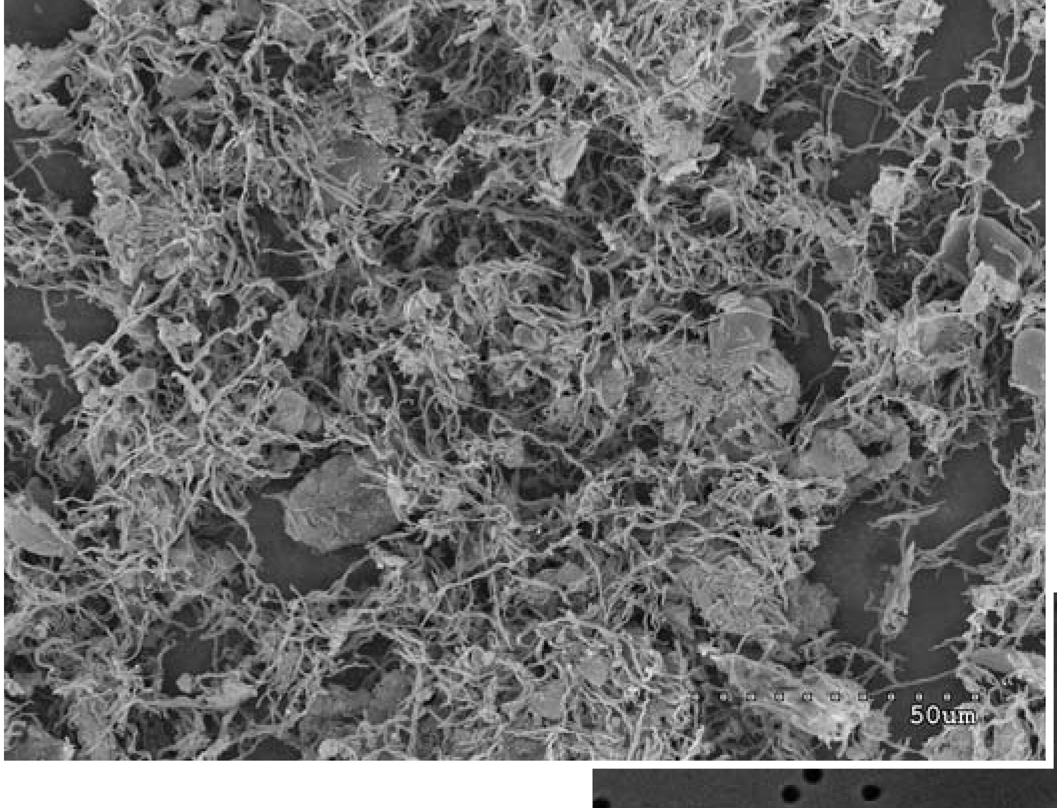
Elisabet L. Sà, Ferran Garcia-Pichel, Oriol Oms, Florenci Vallès y Josep M. Gasol



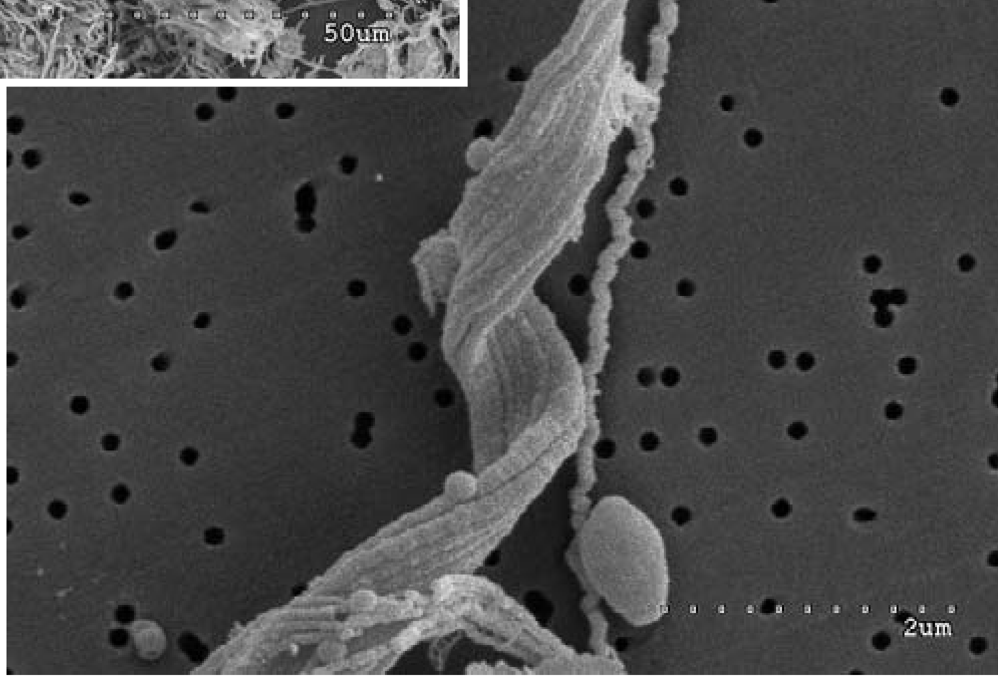
Entre los visitantes de la surgencia salina del Torrent Salat d'Avinyó, en la provincia de Barcelona, muy pocos saben que este ecosistema guarda una estrecha semejanza con las fuentes hidrotermales de los fondos marinos. La surgencia se encuentra situada en un bosque de pino carrasco y negral. En surgencias salinas y fuentes hidrotermales afloran "jardines" anaranjados de bacterias del género *Gallionella*, con típicas coloraciones rojizas, cromatismo que deben a las acumulaciones de robín. Esos tapices microbianos se desarrollan dondequiera que haya afloramientos de hierro reducido y bajos niveles de oxígeno; las bacterias mencionadas obtienen energía de la oxidación del hierro reducido.

El acuífero que nutre el Torrent Salat circula por rocas que contienen sal común. El agua lleva poco oxígeno, pero grandes cantidades de hierro y otros metales. La concentración de cloruro es similar a la del mar, de ahí que las comunidades que se desarrollan recuerden las de algunos fondos oceánicos. Sin embargo, a diferencia de los abisales y oscuros jardines marinos, el Torrent Salat está bañado por la luz del sol. La radiación solar facilita el crecimiento de algas, diatomeas y cianobacterias, que lo convierten en una maravilla de la ecología microbiana.

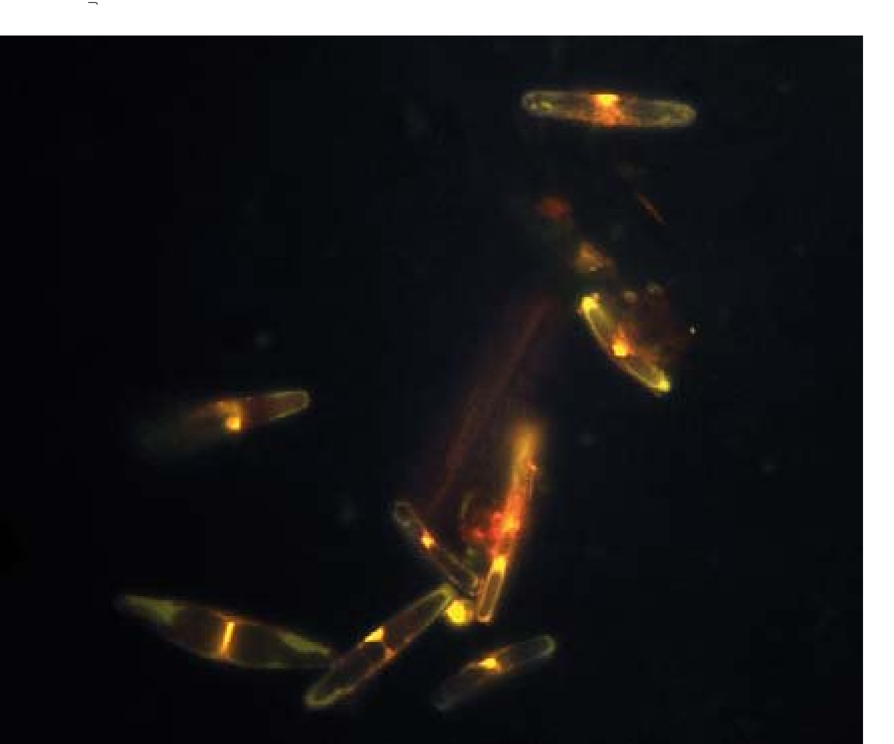
1. El Torrent Salat. El inserto muestra con mayor detalle los depósitos de óxidos de hierro de este afloramiento salino, donde abunda *Rhizoclonium* cf. *hieroglyphicum* (*verde amarillento*), alga clorofícea filamentosa.



2. Las galionelas forman largas vainas extracelulares que componen grandes filamentos retorcidos en forma de trenza (*abajo*). Células y vainas se mezclan con partículas de sedimento y precipitados de óxido de hierro (*izquierda*). Ambas imágenes corresponden a microscopías de barrido.



J. M. FORTUÑO E I. LEKUNBERRI (ICM) (*imágenes de barrido*)



3. Diatomeas procedentes de una de las zonas del Torrent Salat donde no hay óxidos de hierro (imagen obtenida por epifluorescencia).

Marshall W. Nirenberg: padre biológico del código genético

En los años sesenta del siglo pasado, Marshall W. Nirenberg descifró el código genético, la combinación de los nucleótidos A, T, G y C que especifican los aminoácidos. ¿Por qué se le atribuye todavía a Francis Crick?

Ed Regis

En el verano de 2006, Marshall W. Nirenberg encontró por casualidad una biografía recién publicada sobre un biólogo molecular prominente. Llevaba por título *Francis Crick: Discoverer of the Genetic Code.*

"¡Es increíble!", pensó. "¡Esto absurdo y falso por completo!"

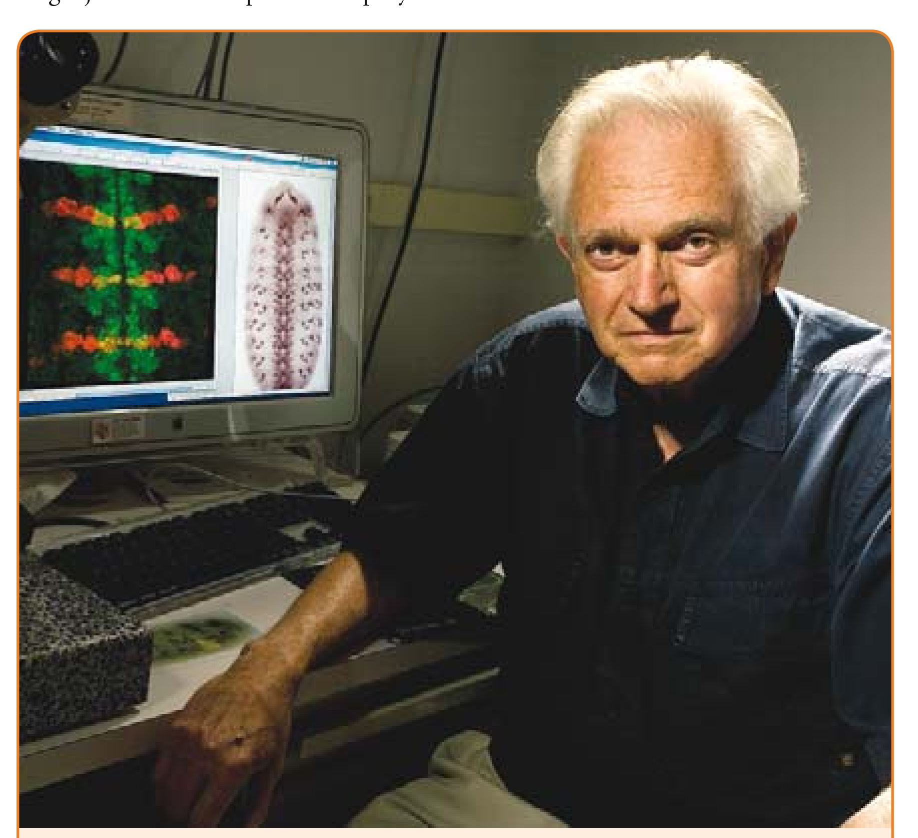
El mismo Nirenberg, junto con otros dos científicos, había recibido en 1968 el premio Nobel de medicina y fisiología por la interpretación del código genético y de su función en la síntesis de proteínas. Pero ninguno de los que compartieron el premio con él se llamaba Crick, sino Robert Holley y Gobind Khorana.

El incidente ponía de manifiesto la veleidad de la fama. Y no se trataba de un ejemplo aislado. Nirenberg poseía una larga y amarga experiencia sobre atribuciones erróneas similares. El desciframiento del código genético constituyó uno de los avances más importantes de la biología molecular, únicamente por detrás del descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN protagonizado en 1953 por Crick y James D. Watson. Pero mientras que sus nombres resultan familiares para muchos, el de Marshall Nirenberg, no.

Nirenberg, de 80 años de edad, es en la actualidad jefe de laboratorio en el norteamericano Instituto Nacional de la Salud (NIH), donde ha desarrollado toda su carrera científica. En las paredes de su oficina destacan copias enmarcadas de sus cuadernos de laboratorio, donde aparecen las tablas con los resultados de su trabajo sobre el código genético. Muchos de los documentos originales y algunos de los instrumentos que se utilizaron en esa investigación se exhiben en el primer piso del hospital de los NIH, en la exposición "Breaking the Genetic Code" (Desciframiento del código genético).

En los años cincuenta se había planteado la hipótesis sobre la existencia de un código genético. Pero se desconocía el proceso de síntesis de las proteínas. Cuando Nirenberg se incorporó al NIH en 1957, para realizar un posdoctorado en bioquímica, la interpretación del código genético no era un tema prioritario en su programa. A pesar de ser un alumno ambicioso, la descodificación del lenguaje de la vida le parecía un proyecto desmesurado para sus fuerzas, al menos en un principio.

El interrogante que se planteaba era el siguiente. La información contenida en la molécula de ADN está codificada por las bases adenina, timina, guanina y citosina (A, T, G y C). La secuencia completa de esos cuatro nucleótidos, que aparecen en combinaciones casi infinitas a



KAY CHERNUSH

MARSHALL W. NIRENBERG

ESCLARECEDOR DEL CODIGO GENETICO: Su solución aportó a la ciencia lo que James Watson denominó "la piedra Rosetta de la vida".

PERSONALIDAD MODESTA: Ganador del premio Nobel, sentó los cimientos de la biología molecular, pero nunca anheló la fama: "[Francis] Crick me dijo lo tonto que yo era por no tratar de acaparar la atención."

SU NUEVA AREA DE INVESTIGACION: "Mi interés se centra ahora en la neurobiología porque existen sólo dos sistemas biológicos en los que la información se guarda y recupera: el genoma y el cerebro."

lo largo de las cadenas, constituye un mensaje molecular para la construcción de un organismo. Cada secuencia de tres letras de nucleótidos (codón) representa un aminoácido concreto. Por ejemplo, GCA corresponde a la alanina, uno de los 20 aminoácidos que se hallan en los organismos animales. La maquinaria celular concatena los aminoácidos para sintetizar las proteínas que dan origen a un ser vivo. La tarea de descifrar el código genético se limitaba entonces a descubrir la correspondencia entre las secuencias de tres letras y los aminoácidos en cuestión.

En 1955, el propio Crick intentó resolver el problema; no mediante la experimentación, sino de forma teórica: a la manera en que el criptoanalista descifra un mensaje. Al no lograrlo, Crick abandonó el terreno. (Es posible que la gente atribuya hoy en día a Crick el descubrimiento del código por sus intentos teóricos y debido a que en 1966, a partir de los experimentos de otros autores, trazó una de las primeras representaciones gráficas del código completo.)

Nirenberg inició su trabajo sobre el código alrededor de 1960. Pero primero tuvo que hacer frente a una cuestión preliminar. "Me preguntaba si el ADN se interpretaba directamente para formar las proteínas." Sabía que el ADN residía en el núcleo celular, mientras que la síntesis de proteínas se desarrollaba en el citoplasma. Por consiguiente, o bien el mismo ADN salía del núcleo o bien lo hacía alguna molécula intermediaria (lo que se conoce en la actualidad como ARN mensajero). "Luego la pregunta era si existía un ARN mensajero. Y pensé que si ideaba un sistema acelular de síntesis proteínica a partir de *E. coli* y le añadía ADN, o ARN, entonces podría observar si estas moléculas estimulaban la síntesis de proteínas."

El sistema acelular constituye uno de los instrumentos más extraños de la biología experimental. También nombrado hialoplasma, consiste en una masa de células a las que se ha eliminado la membrana; en el citoplasma libre resultante los orgánulos celulares originales se mantienen en gran parte inalterados y funcionales. A finales de 1960, Nirenberg y Heinrich Matthaei, que se había incorporado al laboratorio de Nirenberg, descubrieron que la introducción de ARN en el sistema acelular daba lugar a la síntesis de proteínas, pero no así cuando se añadía ADN.

Por tanto, el ARN era la molécula que dirigía la síntesis de proteínas. En algún momento, Nirenberg planteó la hipótesis de que si podía introducir un triplete de ARN específico y conocido en el sistema acelular, y si el sistema respondía con la síntesis de un aminoácido diferenciado, entonces conseguiría una clave para descifrar el código genético. En ese tiempo, otros investigadores del NIH fabricaban cadenas de nucleótidos sintéticos, moléculas de cadena larga en las que se repetía la misma base: AAAAA... (cadenas poli-A), TTTTT... (poli-T), y así sucesivamente.

Nirenberg consiguió cierta cantidad de cadenas de poli-U (en el ARN, el uracilo sustituye a la timina del ADN) y escribió un protocolo experimental que debía aplicar Matthaei. Y sucedió que, a últimas horas de una noche de mayo de 1961, Matthaei añadió cadenas de poli-U a un sistema acelular.

Fue un momento histórico: el hialoplasma reaccionó mediante la producción en masa del aminoácido fenilalanina. Se había descifrado un codón. El triplete UUU se convirtió en la primera palabra del diccionario químico de la vida. "Fue realmente asombroso", recuerda hoy Nirenberg.

El científico anunció el resultado en agosto de 1961, en un congreso sobre bioquímica celebrado en Moscú. Poco después le surgió un rival: el premio Nobel Severo Ochoa, entonces en la facultad de medicina de la Universidad de Nueva York, había creado su propio laboratorio, en donde empezó a descifrar también el código genético. Ochoa continuó sus investigaciones hasta el año 1964, cuando, en una reunión de la Sociedad Química estadounidense, él y Nirenberg presentaron sus datos. En ese punto, ambos científicos habían descubierto la composición de bases, pero no la secuencia, de numerosos codones. Ochoa habló primero e informó sobre la composición de algunos de ellos. "Yo era el siguiente conferenciante", recuerda Nirenberg. "Describí un ensayo sencillo que podía aplicarse para determinar la secuencia de nucleótidos de los codones de ARN. Después de eso, Ochoa dejó de trabajar en el código genético."

En 1966, con la ayuda de las contribuciones fundamentales de Holley y Khorana, Nirenberg había identificado la composición y la secuencia de bases de los 64 trinucleótidos del código genético. Ello le valió, en 1968 y de forma compartida, el Premio Nobel. Con todo, se acabó convirtiendo en el padre olvidado del código genético.

¿A qué se debió? "Supongo que por mi forma de ser", comenta Nirenberg. "Soy tímido y reservado. Me gusta trabajar y nunca me he apartado de mi camino para hacer publicidad sobre mí mismo. Crick me dijo lo tonto que era por no tratar de acaparar la atención." Además, el descubrimiento de Watson y Crick dio lugar a una imagen simple y visualmente impresionante. Una estructura brillante en forma de escalera de caracol. Por el contrario, el código genético se presentaba en forma de rompecabezas de nombres de sustancias químicas intimidantes, una auténtica pesadilla para un publicista.

Para Nirenberg, había otras cosas mejores a las que dedicarse antes que lustrar su reputación. Así, concentró su talento en la investigación del cerebro. Quería descubrir el modo en que los axones y las dendritas se encuentran, unos con otras, durante el desarrollo embrionario y cómo transmiten el impulso nervioso.

Para averiguarlo, él y sus colaboradores describieron miles de líneas de células nerviosas, entre ellas las células híbridas de músculo y nervio. Demostró que, mediante la estimulación eléctrica de una célula nerviosa, podía registrar una respuesta a través de la sinapsis con las células de músculo estriado (resultado equivalente, a nivel celular, al de Luigi Galvani, que en el siglo XVIII produjo movimiento muscular en una rana). Los experimentos con moscas de la fruta revelaron la existencia de cuatro genes nuevos, de *NK-1* a *NK-4*, que regulan la diferenciación de las células nerviosas embrionarias (neuroblastos).

A lo largo de los últimos veinte años, Nirenberg ha acumulado 71 publicaciones en neurobiología. Sin embargo, aunque numerosos, esos estudios probablemente nunca eclipsarán su interpretación del lenguaje de la vida. El hecho de que no sea conocido por ese descubrimiento no parece afectarle. "El desciframiento del código genético fue extraordinariamente divertido", explica. "Realmente apasionante". La fama puede ser fugaz, pero el código genético perdurará mientras exista la vida.

Vence el plazo para controlar la malaria

Las principales dificultades para frenar esta enfermedad en Africa antes de 2010 son organizativas, no técnicas

Jeffrey D. Sachs

En un enérgico llamamiento a la acción el pasado mes de abril, el secretario general de las Naciones Unidas, Ban Ki-moon —respaldado por la Unión Africana, la Organización Mundial de la Salud, UNICEF, la Fundación Gates, Exxon Mobil, el Banco Mundial, y el Fondo Global para la Lucha contra el Sida, la Tuberculosis y la Malaria, entre otras organizaciones y consorcios internacionales importantes— fijó un calendario para el control integral del paludismo en Africa antes de que expire el año 2010. Ki–moon ha arrojado el guante: no hay razón por la que tengan que morir un millón de niños o más cada año de una enfermedad en gran parte evitable y tratable.

El objetivo operativo consiste en asegurar que las intervenciones decisivas se tomen cumplidamente y en su justa medida dentro de los próximos dos años y medio. Como describí en estas líneas en diciembre de 2007, el paquete de medidas técnicas para controlar la enfermedad está fijado. Debería haber métodos para frenar al mosquito portador (sobre todo mosquiteras empapadas en insecticida y fumigación de interiores), tratamiento a tiempo de cada caso clínico con medicación efectiva, tratamiento preventivo a las mujeres embarazadas y personal sanitario local formado, que servirá de enlace entre los hospitales y la población. En vista de las vidas que pueden salvarse y los beneficios económicos que supone el control de la enfermedad, los tres mil millones de dólares anuales que costaría es una verdadera ganga para el planeta.

La principal dificultad es, por tanto, más organizativa que conceptual o científica. Numerosos escépticos dudan del funcionamiento de este tipo de programas. Mucho menos con un calendario apretado. El sistema internacional corresponde a un cúmulo de instituciones públicas y privadas sin una idea clara de sus competencias, con dificultades para coordinarse y sin un director que los “orqueste”. Muchas instituciones reciben financiación sólo de forma ocasional. Los gobiernos receptores no siempre destacan por su transparencia, eficiencia y responsabilidad, por decirlo de una forma suave.

Aun así, las posibilidades de éxito son notables. Numerosos dirigentes africanos llevan largo tiempo comprometidos con esa lucha. El secretario general de la ONU y la oficina de su enviado para la malaria constituye el referente en cuanto a liderazgo. El Fondo Global para la Lucha contra el Sida, la Tuberculosis y la Malaria funciona como organización financiera preponderante. Además, el gobierno de EE.UU. se ha comprometido a aportar una considerable contribución, que probablemente se verá aumentada en vista del sólido respaldo del Congreso. Por último, la sociedad Roll Back Malaria tiene años de experiencia en reunir bajo un mismo techo a un sinnúmero de instituciones implicadas.



Las técnicas necesarias son sencillas y más fáciles de usar que las aplicadas para controlar la pandemia de VIH/sida. Podría llevarse a cabo un rápido despliegue de mosquiteras y medicamentos contra el paludismo con buenos resultados. También sirve de estímulo el éxito de la campaña de inmunización, iniciada en 2000, por la que se han reducido en más del 90 por ciento las muertes por sarampión en Africa. Entre otros logros recientes se incluyen el control de la polio, la lepra y el gusano de Guinea.

Pero el tiempo apremia. Se requerirá un grado de coordinación sin precedentes entre financiación, formación, vigilancia y logística. Cada país subsahariano deberá adoptar, examinar, financiar y vigilar en poco tiempo un plan intensivo contra la malaria. Los principales fabricantes de mosquiteras de cama, fármacos y herramientas de diagnóstico del paludismo deberán aumentar su producción en centenares de millones de unidades. Decenas, incluso cientos de miles de sanitarios locales necesitarán semanas de formación.

Es demasiado lo que está en juego. No sólo millones de vidas, sino también nuestra capacidad para cumplir con objetivos importantes y decisivos. En el caso de la malaria, podemos restablecer la salud y desencadenar ganancias económicas enormes, pero sólo si las agencias (múltiples), decenas de países y cientos de millones de individuos llevan a cabo una acción efectiva conjunta. El éxito permitirá enfrentarnos a dificultades igualmente urgentes, como la producción de alimentos, la gestión del agua, la conservación de la biodiversidad y el control del clima, por mencionar algunos ámbitos cruciales. El fracaso sería probablemente demasiado doloroso. La cuenta atrás hacia 2010 ha comenzado.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

La Luna de las dos caras

Se ignora por qué la cara visible de nuestro satélite difiere tanto de la cara oculta. Pero las investigaciones en curso se muestran confiadas en averiguarlo

P. Surdas Mohit

CONCEPTOS BASICOS

- La cara visible y la oculta de la Luna presentan grandes diferencias. La cara visible posee extensos mares de basalto y acumula casi todo el torio radiactivo. La corteza de la cara oculta es más gruesa.
- Distintos modelos intentan explicar esas diferencias. Y una correlación: ¿por qué esa diferenciación hemisférica coincide —aunque no exactamente— con la correspondiente a la permanente orientación de la Luna con respecto a la Tierra?
- Esa coincidencia podría ser en buena medida casual. Que no sea perfecta es una de las razones para pensarlo.

En octubre de 1959, la sonda soviética Luna 3 tomó la primera fotografía de la cara oculta de la Luna. Para sorpresa de todos, se reveló totalmente diferente del hemisferio que nos es familiar.

La cara de la Luna que observamos presenta unas áreas oscuras conspicuas. Llamadas "mares" por los astrónomos del pasado, en un principio se pensó que contenían agua. Pero hoy se sabe que el color oscuro se debe al tipo de roca que existe allí. La sonda soviética Luna 3 demostró que apenas había formaciones tales en la cara oculta. Desde aquellas primeras fotografías, se han obtenido muchas más y han surgido multitud de modelos que se proponen reproducir sus rasgos. Casi medio siglo después, los científicos planetarios han progresado notablemente, aunque persiste pendiente una explicación definitiva de la asimetría de los hemisferios lunares. En este artículo esbozo las líneas de una teoría que podría facilitar la respuesta.

Mi propia contribución al tema se fundamenta en los estudios que he realizado durante los últimos años acerca de las grandes cuencas de impacto de la Luna y de otros lugares del sistema solar. Pero tal y como relato a continuación, ese trabajo apenas resuelve una pequeña pieza del rompecabezas. Los hallazgos relevantes para esta cuestión se han ido acumulando durante décadas, muchos de ellos producto de la carrera por enviar astronautas a la Luna.

Un océano de magma

El programa Apolo, catapultado a la fama por la promesa hecha en 1961 por el presidente John F. Kennedy de enviar un hombre a la Luna "antes de que se acabara esta década", ha sido uno de los objetivos científicos más ambiciosos y costosos de la historia. Merced a la recogida de numerosas muestras, las mediciones sobre la superficie y las observaciones por satélite, aquellas misiones espaciales permitieron avanzar en el conocimiento científico de la Luna y estimularon el desarrollo de muchos de los principios que hoy día se aplican en física planetaria.

Entre otras cosas, las misiones Apolo condujeron a que se forjara la teoría básica del origen de la mayoría de las rocas de la Luna. La clave estuvo en el descubrimiento de que una parte importante de la Luna se fundió durante su formación y de que las rocas que se ven en la superficie —y otras subyacentes cuya existencia se infiere— cristalizaron



RUSSELL CROMAN/*Photo Researchers, Inc./American Scientist*

en un "océano de magma" global, que quizá tuvo inicialmente una profundidad de 500 kilómetros o más.

La energía necesaria para fundir tal cantidad ingente de roca procede de un impacto colosal entre un cuerpo del tamaño de Marte y la prototierra. Gran parte de los escombros de la colisión se coagularon y formaron la Luna, que se configuró como un pastel de capas, con los materiales más densos en el fondo y los más ligeros arriba, entre ellos una cantidad prodigiosa de magma.

Al enfriarse el océano de magma, los minerales cristalizaron conforme a una secuencia dictada por sus temperaturas de solidificación respectivas. Los minerales menos densos (el feldespato de plagioclasa) flotaron hacia la superficie, mientras que los más densos (la olivina) se hundieron en las profundidades. Los geólogos llaman "cumulatos" a las rocas que presentan una composición en capas.

Existen ciertos elementos, denominados "incompatibles", que no se someten fácilmente a la estructura cristalina de los minerales. El hierro es un incompatible en cierta medida. Elementos más pesados, como el uranio y el torio (los elementos radiactivos más importantes de la Luna), son muy incompatibles. Por tanto, los minerales que se cristalizaron pronto en el océano de magma de la Luna contienen pequeñas concentraciones de hierro. La mayor parte del hierro y de los elementos muy incom-

1. A PESAR DE SU CARA VISIBLE, tan familiar, la Luna guarda muchos misterios para la ciencia. Entre los más fascinantes, cuantos se refieren a su origen e historia primitiva. Varias pruebas clave proceden de las misiones Apolo de los años sesenta y setenta: los astronautas visitaron los mares oscuros de la Luna y las tierras altas de colores más claros. Ambos tipos de región se distinguen con nitidez en esta vista telescópica de la Luna.



2. EN 1959 LA SONDA ESPACIAL SOVIETICA LUNA 3 tomó las primeras fotografías de la cara oculta de la Luna. La calidad de las imágenes, aunque pobre, permitió contemplar que el hemisferio hasta entonces invisible carece de mares, que cubren una fracción importante de la cara visible. La razón de semejante asimetría constituye todavía un asunto de investigación.

patibles se resistieron a unirse a los minerales, hasta el final. Como resultado, el líquido residual de las últimas fases de la solidificación del océano de magma estaba muy enriquecido en hierro y elementos radiactivos.

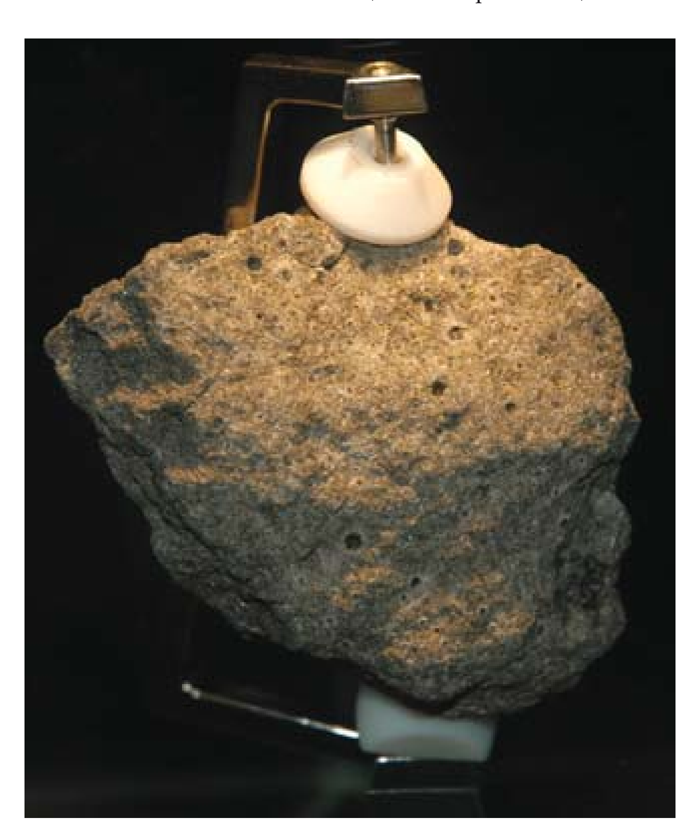
Gran parte de la superficie lunar —las zonas elevadas y brillantes— consta de rocas de color claro, las anortositas, hechas sobre todo de feldespato de plagioclasa. El elevado número de impactos de cráteres que salpican los altiplanos refleja una antigüedad notable. El otro componente más abundante de la superficie lunar es el basalto oscuro. Estas rocas se solidificaron a partir de lavas expelidas y se estancaron en enormes cuencas de impacto, creándose así los "mares" de la Luna.

El análisis geoquímico de ambos tipos de roca revela un origen común. La anortosita contiene ciertas cantidades del elemento pesado europio, compatible con la estructura cristalina del feldespato de plagioclasa. Las rocas que llenan los mares presentan una carencia de europio, indicio de que la fuente de los basaltos fue un magma donde ya no se fabricaba feldespato de plagioclasa.

De parejo interés resultó el descubrimiento en las rocas de KREEP, cuyo nombre indica que sus componentes son potasio (símbolo químico K), tierras raras (REE) y fósforo (símbolo químico P). KREEP se halla sobre todo en rocas que muestran señales de haberse roto y rehecho por un impacto y el calor que desprendió. Es muy rico en elementos incompatibles. Sin duda, KREEP contiene una proporción de elementos así, incluidos los radiactivos —uranio, torio—, mayor que cualquier otra roca terrestre. La composición de marras resulta congruente con su formación en las fases finales del océano de magma lunar. Muy probablemente, KREEP se solidificó en las profundidades de la Luna y ahora se encuentra donde un impacto colosal puso al descubierto parte del subsuelo.

Asimetrías múltiples

Las mediciones realizadas durante los años del Apolo y el paradigma del océano de magma ayudaron a comprender la irregularidad de la superficie lunar, pero no permiten explicar la diferencia entre las dos caras lunares. Se obtuvieron más pistas en 1994 con el lanzamiento de la nave espacial Clementina ("Experimento científico del programa del espacio profundo"), de la Organización de la Defensa Mediante Misiles Balísticos y la NASA. Clementina proporcionó la primera base global de datos digitales de la Luna. Las observaciones de Clementina y los datos obtenidos en 1998 por el Prospector Lunar se juntaron para levantar mapas de la topografía lunar, la gravedad y los





3. AUNQUE SE PUEDEN ENCONTRAR MINERALES MUY DIVERSOS en la superficie lunar, la coloración clara u oscura de las regiones corresponde sobre todo a dos variedades de roca subyacente: basalto (*izquierda*), que reside en los mares oscuros, y la anortosita (*derecha*), que cubre la mayor parte del resto de la superficie de la Luna.



CORTESIA DE RICARDO NUNES (*arriba*); CORTESIA DE JAMES ST. JOHN (*abajo, izquierda*); CORTESIA DE CHIP CLARK, INSTITUTO SMITHSONIANO (*abajo, derecha*)/*American Scientist*

campos magnéticos, así como las proporciones relativas de varios de los elementos clave.

Estos mapas revelaron que las caras oculta y visible son asimétricas en múltiples aspectos. En concreto, las dos caras difieren en el espesor de la corteza, la capa fina y de baja densidad que yace sobre el manto rocoso de la Luna, que a su vez rodea a un núcleo metálico.

Parecerá sorprendente que las sondas espaciales en órbita sean capaces de medir el grosor de la corteza lunar. En realidad, no pueden hacerlo. Pero cabe evaluar el grosor de la superficie a partir de las medidas de la gravedad lunar. Las variaciones topográficas de la superficie de la Luna producen un efecto en la fuerza de gravedad que siente la sonda espacial. La masa extra de las montañas, por ejemplo, atrae ligeramente a la nave espacial, que experimenta un menor tirón gravitatorio cuando se sitúa sobre tierras bajas, con una carencia de masa. Es sencillo evaluar las variaciones gravitatorias producidas por los cambios topográficos y restarlas del campo gravitatorio global. Se descubren así ondulaciones, de otra manera invisibles, de la interfaz enterrada entre la corteza y el espeso manto subyacente.

Se conjugó esa información con las escasas estimaciones del grosor de la corteza obtenidas de mediciones sísmicas en las misiones Apolo. Así se ha creado el mapa global del espesor de la corteza lunar, que es de entre 35 y 65 kilómetros en su mayor parte. El mapa mostró que la corteza de la cara oculta es, en promedio, bastante más gruesa que en la cara visible.

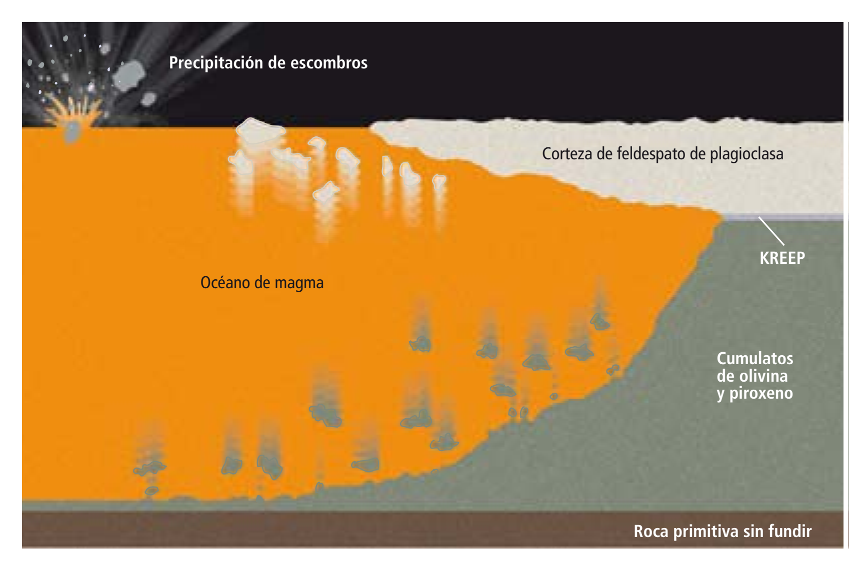
Clementina y el Prospector Lunar han permitido que se represente gráficamente la concentración de hierro en la superficie. Los mapas finales muestran concentraciones de hierro mucho mayores en la cara visible de la Luna. Esta asimetría se debe sobre todo a las grandes cantidades de basalto que se expulsaron y llenaron los mares de la cara visible, si bien hay indicios de que los impactos que crearon las cuencas de esta cara lunar excavaron hasta una corteza inferior medianamente enriquecida en hierro.

La mayor de todas las asimetrías es la del torio, elemento radiactivo que se halla casi por completo sólo en la región del océano Procellarum, en el centro de la cara visible.

Mares

Se han avanzado diversas hipótesis para dar cuenta del origen de las asimetrías. Si queremos entenderlas, debemos analizar en mayor detalle la formación de los mares.

Los astronautas de las Apolo trajeron numerosas muestras de basaltos de los mares.



4. LO QUE SE SABE DE LA EVOLUCION DE LAS TIERRAS ALTAS LUNARES de color claro se fundamenta en la captación de escombros, en órbita alrededor de la Tierra, que formó la Luna; dicha captación debió de producir tanto calor como para que se fundieran. Se creó así un espeso océano de magma, que alcanzó los 500 kilómetros de profundidad o más. Con el tiempo, el océano de magma se enfrió y en su interior se generaron minerales sólidos. Los minerales más densos que el líquido circundante (sobre todo olivina y piroxeno) se hundieron en el fondo del océano de magma. Los minerales menos densos, como el feldespato de plagioclasa, ascendieron hacia la superficie, donde crearon la corteza de anortosita de color claro de la Luna. El potasio (K), las tierras raras (REE son las siglas en inglés) y el fósforo (P) se resistieron a la integración en los minerales hasta el final del proceso de solidificación. Como resultado, estos y otros elementos "incompatibles" crearon unas rocas sólidas, del tipo denominado KREEP, originalmente situadas en una capa soterrada entre la corteza rica en feldespato de plagioclasa y los "cumulatos" ricos en olivinas y piroxenos de debajo.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

Los análisis posteriores han revelado pistas fundamentales sobre su origen. Estas rocas difieren bastante de los basaltos terrestres, ya que son mucho más densas y ricas en hierro (y a veces en titanio). Tal composición sugiere una formación tardía en la solidificación del océano de magma.

Los geoquímicos han pensado que la siguiente situación podría explicar cómo se llenaron los mares de estos basaltos. Después de que cristalizara aproximadamente el 95 por ciento del océano de magma, las nuevas rocas formadas contenían una alta cantidad de hierro y grandes proporciones del mineral ilmenita, un óxido de titanio. Los cumulatos ricos en ilmenita son muy densos, mucho más densos que el manto subyacente. En consecuencia, con el tiempo se hundieron y el manto subyacente se deformó plásticamente.

Ya que se solidificaron tan tarde en el océano de magma, las rocas ricas en ilmenita incorporaron cantidades considerables de elementos incompatibles, como el hierro y el titanio. En concreto, atraparon uranio y torio

radiactivos en abundancia, además de potasio, un isótopo común que también es radiactivo. La energía producida por la desintegración radiactiva —intensa fuente de calor en escalas de tiempo geológicas— calentaron las rocas que, en consecuencia, se expandieron y, perdieron densidad. Tras el primer hundimiento, flotaron, ascendieron hacia la superficie y se fundieron. Las lavas resultantes llenaron buena parte de las cuencas de los impactos: se convirtieron en mares oscuros.

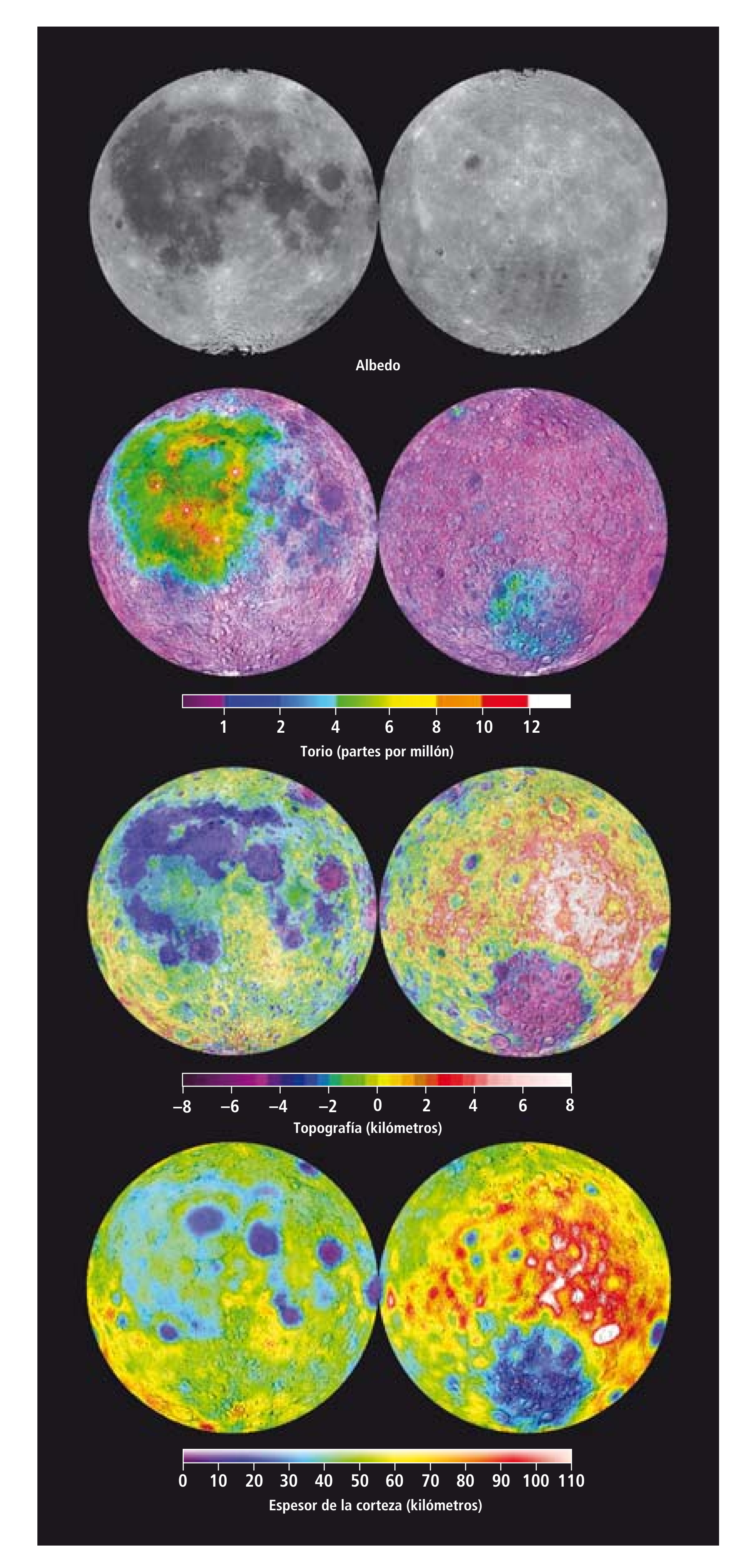
Un grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts y de la Universidad Brown, dirigido por Shijie Zhong (ahora en la Universidad de Colorado), elaboró un modelo numérico de estos movimientos. Los investigadores demostraron que, en condiciones adecuadas, el proceso puede producir patrones de flujo tales, que los cumulatos calientes afloren sólo en uno de los hemisferios de la Luna.

David R. Stegman y su equipo, de la Universidad de California en Berkeley, demostraron más tarde que, si el afloramiento de los materiales del manto se extendió hasta el núcleo lunar, quizás estimulase el enfriamiento convectivo del metal líquido del interior; si fue lo suficientemente intenso, generaría un campo magnético. Hay indicios de que la Luna tuvo un campo magnético de origen interno, aunque no se han disipado las dudas. Aun así, podríamos precipitarnos y concluir que todo encaja y que la razón de la asimetría de los mares en los dos hemisferios está ahora aclarada. Pero no sería verdad.

Los modelos de Zhong mostraron que la pauta convectiva de los hemisferios sólo puede surgir si el radio del núcleo lunar es de 250 kilómetros o menos. Las medidas recientes sugieren que el núcleo tiene un tamaño probable de unos 350 kilómetros, lo que obliga a pensar en la intervención de un mecanismo distinto.

Con un impacto

Como parte de mi investigación doctoral en la Universidad de Washington en St. Louis, estu-



5. MUCHAS DE LAS PROPIEDADES DE LA CARA OCULTA de la Luna contrastan con las de la cara visible. La más obvia es la carencia de mares oscuros; tal diferencia se aprecia con nitidez en las mediciones del albedo (grado en que se refleja la luz) recogidas por la sonda Clementina en 1994 (*arriba*). Diverge también la distribución de torio: la mayor parte del torio y de otros elementos radiactivos se concentran en las rocas de la superficie de la cara visible (*segunda figura desde arriba*). La topografía y el espesor de la corteza (*tercera y cuarta figuras*) son muy distintos entre las dos caras lunares.

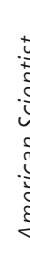
CORTESIA DE PAUL SPUDIS Y DEL INSTITUTO DE CIENCIA LUNAR Y PLANETARIA/*American Scientist*







6. UN MODO DE ESTUDIAR EL INTERIOR LUNAR consiste en analizar la evolución de los mayores cráteres de impacto. Mientras que los impactos pequeños apenas penetran en la superficie y crean cráteres sencillos con forma de cuenco (*izquierda*), los grandes hacen que la roca golpeada se comporte temporalmente como un líquido. Este fenómeno conduce con frecuencia a la aparición de picos centrales (*centro*) y, en los mayores impactos, a la aparición de "multianillos" (*derecha*).



dié la conservación de las cuencas de impacto lunares. Me proponía ahondar en la temprana historia térmica de la Luna. Me centré en la relajación viscosa, fenómeno que sucede en muchos lugares del sistema solar.

En la Tierra, donde la corteza es gruesa y las temperaturas de la parte inferior de la corteza altas, el fondo de la corteza, aunque sólido, fluye plásticamente con el tiempo; en muchos aspectos se comporta como un fluido viscoso. Estos movimientos pueden allanar los distintos espesores de la corteza. Un ejemplo por antonomasia en la Tierra de este proceso se da bajo los Himalayas. Allí, el subcontinente indio se apoya sobre una placa tectónica en colisión con Asia, con el resultado de que la corteza está en el borde comprimida y engrosada. La viscosidad de las rocas disminuye al aumentar la temperatura, por lo que a gran profundidad debajo de los Himalayas la corteza fluye y relaja la tensión impuesta por todo el material que está acumulado encima.

En la Luna, el espesor de la corteza y la mayoría de las variaciones topográficas se deben a los tremendos impactos acontecidos hace miles de millones de años, que dejaron tras de sí huellas manifiestas en forma de profundas cuencas. Podemos conocer la temperatura de la corteza interior en el momento de la formación de la cuenca analizando si, y hasta qué punto, hubo relajación posterior. El estudio de todas las cuencas arroja una idea de la evolución de las temperaturas del interior de la corteza. El quid está en saber cómo eran las cuencas en el momento de su excavación.

Los resultados de la colisión de un asteroide o un cometa con un planeta se parecen a los de una explosión subterránea. Son tan similares, que en los años cincuenta se emplearon las explosiones nucleares subterráneas para estudiar la dinámica de la creación de los cráteres de impacto en la Tierra y en otros cuerpos celestes. En el momento del contacto, el choque produce una onda que viaja a través del planeta que recibe el golpe y del cuerpo que se lo da, y así se liberan grandes cantidades de energía.

A las velocidades que llevaban los cuerpos rocosos que impactaban sobre la Luna, tuvieron que evaporarse; sólo quedaba un cráter en la superficie. Los cuerpos pequeños producen cráteres elementales, con forma de cuenco. Pero el cráter de tipo cuenco de los cuerpos mayores (o los de mayor velocidad) colapsa y se crea una estructura más compleja, con un pico central o anillos múltiples. Las tensiones durante el impacto son tan altas, que las rocas que rodean el lugar del impacto se comportan como un fluido durante un corto intervalo de tiempo. En conjunto, el proceso recuerda lo que se observa cuando se lanza una piedra sobre un estanque tranquilo: primero se forma una depresión, pero la superficie del agua rebota y sube por encima del nivel de equilibrio, para caer otra vez. Esta oscilación se repite durante cierto tiempo: se produce una serie de ondas circulares.

En el caso de un impacto, el proceso oscilatorio se interrumpe de golpe cuando la tensión cae lo suficiente para que las rocas impactadas recuperen la firmeza. Es la razón por la que los cráteres pequeños presentan sólo un pico central, mientras que los cráteres mayores tienen un anillo central y los más grandes lucen anillos múltiples.

Las cuencas de impacto lunares de las que más información se puede sacar para los problemas de que nos ocupamos aquí son las de anillos múltiples con diámetros de al menos

> ## El autor
>
> **P. Surdas Mohit** obtuvo su doctorado en ciencias planetarias y terrestres en la Universidad de Washington en St. Louis en el año 2007. Hoy es investigador asociado posdoctoral de la Institución Scripps de Oceanografía. Sus investigaciones se centran en la deformación viscoelástica de varios cuerpos del sistema solar. *© American Scientist Magazine.*

400 kilómetros. Las mediciones de la gravedad realizadas sobre estos cráteres son muy reveladoras. En concreto, la gravedad tiende a ser anormalmente intensa (en la jerga científica se dice que estas cuencas muestran anomalías gravitatorias positivas). Una observación que no se compadece con la intuición, ya que las cuencas son en esencia grandes agujeros en el terreno, en los que se ha perdido masa; por tanto, debería esperarse una anomalía gravitatoria negativa.

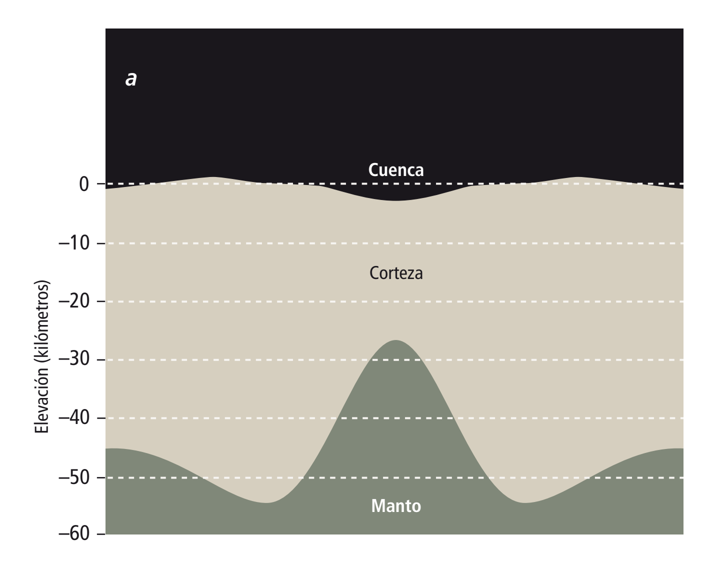
Las anomalías gravitatorias positivas asociadas a los cráteres de anillos múltiples parecen tener dos fuentes principales. Primero, la lava inundó cuencas de la cara visible de la Luna; se produjeron así depósitos gruesos de densos basaltos de mar lunar. También, la deformación oscilatoria causante de cuencas tan grandes alcanzó con frecuencia la base de la corteza, la elevó y trajo el material denso del manto hacia la superficie, donde aumenta el tirón de la gravedad.

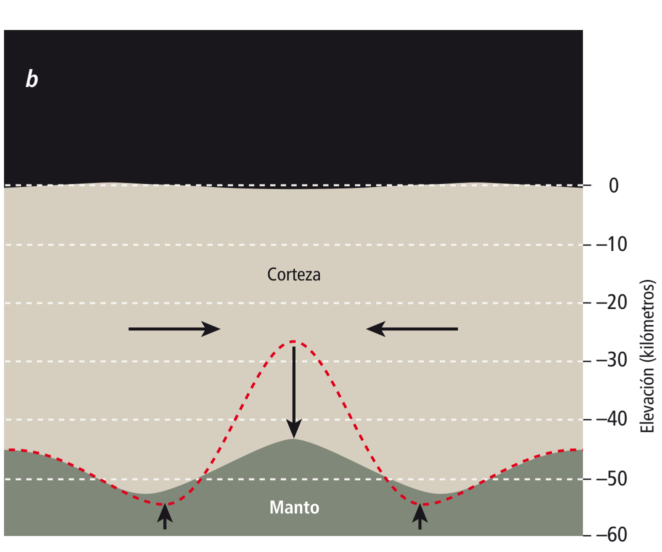
Relajación

La observación de anomalías gravitatorias positivas sobre las cuencas no es universal. A pesar de las cantidades colosales de material excavado en un impacto, la corteza subyacente a las cuencas más antiguas no parece ser más tenue que la de las regiones circundantes. Una posible explicación es que en el momento de estos choques el océano de magma acababa de solidificarse y la parte interior de la corteza, todavía caliente, aún podía fluir hacia las regiones más delgadas. Por tanto, existe una clara distinción entre los cráteres más antiguos, que se han relajado, y los más jóvenes, que conservan su geometría original.

¿Qué condiciones concretas son necesarias para la relajación? Para responder a esta pregunta, he desarrollado un modelo numérico de la deformación planetaria. El modelo considera que la corteza y el manto lunares son sólidos viscoelásticos: es decir, que responden a cargas con una respuesta elástica instantánea, seguida de una relajación viscosa en escalas de tiempo mayores (determinadas por las propiedades físicas de los materiales). Un ejemplo más cercano de este comportamiento viscoelástico nos lo ofrece el rebote de los continentes al final de la Edad de Hielo. El peso de la gigantesca capa de hielo sobre Norteamérica hundió unos cientos de metros la corteza terrestre subyacente. Cuando la capa de hielo se retiró, hace unos 10.000 años, el terreno fue regresando a su posición inicial. Pero no fue un movimiento instantáneo; aún continúa hoy día en muchos lugares. Midiendo el ritmo de este lento movimiento, calculamos la viscosidad del manto sólido de la Tierra.

En el caso de la Luna, utilicé las propiedades conocidas de los materiales para calcular la variación de la viscosidad con la profundidad en un rango de temperaturas posibles. Después ejecuté mi modelo numérico empleando la geometría de una cuenca lunar bien conservada, para averiguar su evolución bajo distintas condiciones térmicas. Obtuve que la relajación sucede más fácilmente en la corteza gruesa, puesto que la deformación plástica de la roca aumenta si está muy enterrada (y, por tanto, caliente).

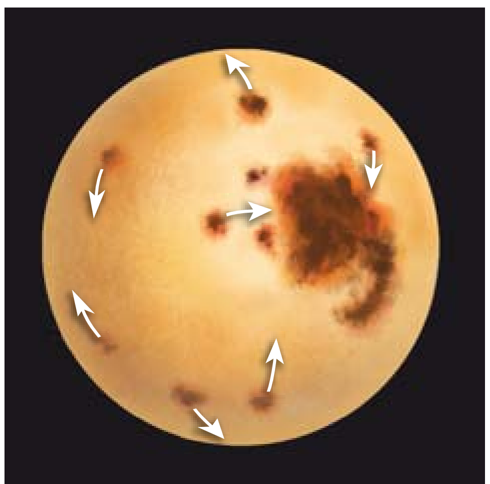




BARBARA AULICINO/*American Scientist*

7. MUCHOS DE LOS MAYORES IMPACTOS presentan anomalías gravitatorias positivas porque en el momento de su formación ascendió denso material del manto hacia la superficie (*izquierda*). Pero si la corteza estaba lo suficientemente caliente, el pico en el manto, aún enterrado, podía allanarse con el tiempo, a medida que la corteza superior fluyese hacia el interior y se espesase (*derecha*), con lo que no quedaría ninguna anomalía gravitatoria significativa.





8. LAS TEORIAS PARA EXPLICAR LAS ASIMETRIAS DE LOS HEMISFERIOS LUNARES se mueven en el terreno de la provisionalidad. De acuerdo con una hipótesis, las rocas ricas en elementos radiactivos se hundieron primero, para luego emerger desde las profundidades del manto lunar. Ese afloramiento habría adelgazado la corteza de uno de los hemisferios e impulsado las lavas basálticas a rellenar las cuencas (*izquierda*). Para otro modelo, las asimetrías de los hemisferios aparecieron mucho antes, durante la fase del océano de magma. La unión de sólidos flotantes —"icebergs" de roca o *rockbergs*— en movimiento aleatorio habría formado un hemisferio "continental" (*derecha*), de modo que la corteza sería especialmente gruesa allí. Los elementos radiactivos se habrían quedado en el magma; más tarde, cuando el océano de magma se enfrió por completo, habrían quedado atrapados en las rocas del hemisferio opuesto.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

Los grandes impactos estrechan la corteza lunar, en unos 20 o 40 kilómetros, lo que a su vez la enfría. Semejante adelgazamiento cortical, provocado por los mayores impactos, tiende a prevenir la relajación posterior. Sin duda, la corteza de la cara visible es tan delgada, que un choque causante de una cuenca de más de 500 kilómetros de diámetro la eliminaría casi del todo y no podría haber un flujo en dicho estrato.

Por el contrario, la corteza gruesa de la cara oculta sí permite el fluido viscoso cerca de su fondo. O más bien habría que decir que una vez lo hizo. Las temperaturas necesarias se encuentran en el rango de los 200 grados centígrados. Viene a ser la temperatura que prevaleció en el interior de la corteza justo después de la solidificación del océano de magma. Como resultado, la relajación viscosa pudo sólo ocurrir en un intervalo no muy largo, tras las últimas etapas en la vida del océano de magma.

Los modelos numéricos que he ejecutado muestran que, tras el impacto, incluso allí donde la relajación viscosa allana la frontera entre el manto y la corteza, se conserva la topografía escarpada de la superficie. Cuanto más fría fuera la temperatura de la corteza, más se conservaría la topografía inicial de la superficie.

Mis modelos, no obstante, no explican por qué muchas de las cuencas de impacto se han relajado por completo, sobre todo algunas de las existentes en la cara visible, donde la corteza es delgada y, al menos en teoría, la relajación no habría sido factible. Una posible solución de este dilema sería la siguiente: admitir que esas cuencas surgieron en un momento anterior a la solidificación total del océano de magma, cuando la corteza interior todavía permanecía fundida en parte. La presencia de líquido en el interior de la corteza facilitaría el flujo y haría posible la relajación incluso en la fina corteza de la cara visible. Cabe otra hipótesis alternativa: un impacto muy enérgico sobre una corteza tan delgada derrumbó por completo cráteres fugaces, justo tras su formación, tal y como se observa en Europa, uno de los satélites helados de Júpiter.

En cualquier caso, tiene interés que la corteza de la cuenca Aitken-Polo Sur de la cara oculta haya permanecido delgada, a pesar de que es el impacto más antiguo (y mayor) de la Luna. Indica que cualesquiera que fuesen las condiciones térmicas existentes en el interior de la corteza durante la formación de las cuencas de la cara visible, no fueron las que se dieron en la cara oculta.

Estas asimetrías, tanto en temperatura como en grosor de la corteza, podrían haber resultado de la dinámica de la solidificación del océano de magma. Recuérdese que la corteza lunar se creó por flotación de los minerales ligeros, sobre todo el feldespato de plagioclasa, en un océano de magma. Los movimientos aleatorios del fluido reagruparon los cristales de plagioclasas en "icebergs" de roca, en *rockbergs*, por encima de los lugares donde el magma se hundía. Los caóticos movimientos horizontales de estos *rockbergs* quizá condujeron a su aglomeración en un "continente" gigante, que formaría el corazón de la corteza de la cara oculta y, en última instancia, provocaría la asimetría de los hemisferios en lo que se refiere al espesor de la corteza.

Si tal conjetura es correcta, el océano de magma debería haberse solidificado primero en la cara oculta. El líquido restante —enriquecido en elementos radiactivos incompatibles— se habría concentrado en la cara visible. El calentamiento radiactivo de estos elementos habría hecho que la cara visible de la Luna sólo se enfriase muy lentamente. Además, los cumulatos ricos en ilmenita se habrían formado sobre todo en esta cara visible. En consecuencia, tal mitad de la Luna

poseería los materiales de los que se originaron las lavas que crearon los mares y alojaría también las fuentes de calor necesarias para fundir las rocas.

Nuestra propuesta ofrece una explicación coherente de las asimetrías obvias de la Luna: el mayor espesor de la corteza y la prevalencia de la relajación viscosa en una de las caras, así como la concentración de KREEP y de basaltos en la otra. Lo que la teoría no explica, sin embargo, es por qué los dos hemisferios de la Luna están dispuestos de tal forma que cuando se observa este astro durante la noche sólo se ve a uno de ellos.

La disposición de las caras

Puede que no exista ningún motivo para la particular disposición espacial de los hemisferios de la Luna. Quizá sea una simple coincidencia. Aunque la declaración no resulte muy satisfactoria, tal vez sea la mejor de momento. Por lo demás no está exenta de soporte, sino que emerge de un análisis más fino de las asimetrías de la Luna.

Resulta que el hemisferio con la corteza más gruesa no coincide por completo con la cara oculta. Ese hemisferio se solapa en gran medida con la cara oculta, pero está girado unos 23 grados respecto al eje Tierra-Luna. Además, la diferencia entre el centro de masas de la Luna y el centro de masas de este cuerpo esférico (una diferencia provocada por los basaltos más densos de los mares) se encuentra girada en idéntica cuantía. De haber actuado algún mecanismo gravitatorio, los dos hemisferios distintos de la Luna se hallarían mejor alineados con la Tierra.

David E. Loper y Christopher L. Werner, de la Universidad estatal de Florida, propusieron una solución interesante del problema: las asimetrías de la Luna habrían sido creadas por una "convección ladeada", noción ésta original de Ruby Krishnamurti y Louis N. Howard, del mismo centro académico.

Cuando a una capa de fluido se la calienta desde abajo o se la enfría desde arriba (o ambas cosas), su comportamiento depende estrechamente de la razón entre la fuerza directriz (la diferencia de densidad entre el fluido de arriba y el de abajo de la capa, creada por la expansión del fluido caliente relativa al fluido frío) y la fuerza de resistencia (sobre todo la viscosidad del fluido). Una vez que esta razón supera cierto valor crítico, el fluido caliente del fondo de la capa comenzará a ascender y el fluido frío de arriba comenzará a descender. Este mecanismo resulta mucho más eficiente que el enfriamiento conductivo.

Al principio, el movimiento en cuestión adopta la forma de "celdas" estables; en ellas, las partes ascendentes y las descendentes presentan una forma geométrica simple. Tales movimientos se observan con facilidad en la sopa de miso caliente de un restaurante japonés: basta mirar cómo las partículas de las semillas de soja siguen el movimiento del líquido.

Si se calienta el líquido, las células de convección se volverán más vigorosas y las ordenadas celdas darán paso a columnas calientes y frías que ascenderán y descenderán por cualquier sitio. Krishnamurti y Howard descubrieron que, si se calienta el fluido por encima de otro valor crítico más, las columnas subirán y bajarán tendiendo un ángulo, con movimiento horizontal y vertical: en otras palabras, habrá convección ladeada.

Puesto que se puede influir en la dirección de la inclinación imponiendo un contraste lateral de temperatura, Loper y Werner supusieron que la convección ladeada en el océano de magma de la Luna —el cual, según sus cálculos, debió de presentar suficiente convección— barrió con preferencia los cristales de anortosita hacia la cara oculta. Según esta hipótesis, las pequeñas diferencias en la temperatura superficial aparecieron porque la cara visible lunar se encontraba más caliente que la cara oculta, al ser bañada por el brillo de la Tierra cuando no la iluminaba el Sol.

La explicación dada exige que la rotación de la Luna se sincronizara pronto en su historia con la Tierra, de modo que una cara mirase constantemente a ésta. La sincronización debió de efectuarse en unos 10 millones de años, tiempo inferior a la duración probable del estado líquido del océano de magma en la Luna. En breve, la hipótesis de Loper y Werner, aunque difícil de probar, resulta plausible.

Cualquiera que sea la explicación de la disposición espacial de los dos hemisferios asimétricos de la Luna y fuese cual fuese el proceso responsable de la aparición de la asimetría, la solución podría estar muy cerca de nuestras manos, siguiendo las líneas de pensamiento descritas aquí. Pero se necesitan más investigaciones para confirmar nuestro razonamiento.

Surgirán más pruebas con la legión de misiones a la Luna planeadas para los próximos cinco años. Estados Unidos, Europa, Japón, China e India proyectan explorar la Luna con robots. Habrá incluso una misión de ida y vuelta, que traerá muestras de la cuenca Aitken-Polo Sur. Habrá que esperar para ver si las expediciones arrojan nueva luz sobre la asimetría de los hemisferios lunares. Una cosa es cierta: pronto sabremos mucho más de nuestro bifronte vecino.

Bibliografía complementaria

ON LUNAR ASYMMETRIES: 1. TILTED CONVECTION AND CRUSTAL ASYMMETRY. D. E. Loper y C. L. Werner en *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, n. E6, págs. 5046. 2002.

THICKNESS CONSTRAINTS ON THE ICY SHELLS OF THE GALILEAN SATELLITES FROM A COMPARISON OF CRATER SHAPES. P. M. Schenk en *Nature*, vol. 417, págs. 419-421; 2002.

AN EARLY LUNAR CORE DYNAMO DRIVEN BY THERMOCHEMICAL MANTLE CONVECTION. D. R. Stegman, A. M. Jellinek, S. A. Zatman, J. R. Baumgardner y M. A. Richards en *Nature*, vol. 421, págs. 143-146; 2003.

VISCOELASTIC EVOLUTION OF LUNAR MULTIRING BASINS. P. S. Mohit y R. J. Phillips en *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, n.º E12001; 2006.

THE CONSTITUTION AND STRUCTURE OF THE LUNAR INTERIOR. M. A. Wieczorek, B. L. Jolliff, A. Khan, M. E. Pritchard, B. P. Weiss, J. G. Williams, L. L. Hood, K. Righter, C. R. Neal, C. K. Shearer, I. S. McCallum, S. Tompkins, B. R. Hawke, C. Peterson, J. J. Gillis y B. Bussey en *Reviews of Mineralogy and Geochemistry*, vol. 60, págs. 221-364; 2006.

Redes mutualistas de especies

Las interacciones entre las plantas y los animales que las polinizan y dispersan sus semillas forman complejas redes de interdependencias que constituyen la arquitectura de la biodiversidad

Jordi Bascompte y Pedro Jordano

CONCEPTOS BASICOS

- El mejor modo de considerar la interrelación entre las plantas y los insectos que propagan su polen no es tomando en cuenta pares de especies así ligadas, sino la red de conexiones de ese tipo que se producen en un ecosistema, en una selva por ejemplo.
- Las redes generadas al azar son bastante homogéneas: no hay nodos con muchas más conexiones que los demás. En cambio, las redes naturales de dependencia benéfica mutua —"mutualistas"— son heterogéneas: presentan nodos hiperconectados. En eso se parecen a Internet.
- Estas redes tienen una arquitectura "encajada" —como muñecas rusas—, y asimétrica, en la que especies que sólo mantienen relaciones con otras muy concretas se relacionan con especies más generalistas.

La diversidad de una selva tropical ha fascinado siempre a los naturalistas. Imagínese paseando por una de estas catedrales biológicas, rodeado de árboles gigantescos cargados de lianas y epífitas. Sobrecogidos, pensamos que esos ecosistemas son inmutables. Pero no hay tal estabilidad en el majestuoso bioequilibrio aparente. Entre otras cosas, depende del servicio que unas especies dispensan a otras. Por ejemplo, la reproducción de más del 90 % de las especies de árboles y arbustos en estas regiones tropicales no sería posible sin los insectos y otros animales de los que depende la polinización de sus flores y la dispersión de sus semillas. Los tucanes toco, por ejemplo, consumen los frutos de los árboles de manduvi en el Pantanal de Brasil. A cambio de esta recompensa, dispersan las semillas lejos del árbol madre, favoreciendo así su regeneración natural. Sin ese auxilio, las semillas caerían bajo el árbol, donde no tendrían ninguna oportunidad de germinar. Así las cosas, si desaparecieran estos animales, todas esas especies de árboles dejarían de reproducirse, se convertirían en fantasmas ecológicos sin descendencia.

Lamentablemente, no se trata de una situación hipotética. La caza selectiva de grandes mamíferos y aves que desempeñan una función muy importante en la dispersión a larga distancia puede tener consecuencias catastróficas para la regeneración del bosque tropical. Además, la fragmentación de esa masa forestal y la pérdida de hábitat que acarrea causan la desaparición de polinizadores y frugívoros de los que dependen los árboles para su regeneración exitosa. La selva es más vulnerable de lo que aparenta.

Beneficio mutuo

Estas dependencias en beneficio mutuo, o mutualistas, entre una especie animal y otra vegetal han desempeñado una función muy importante en la generación de la biodiversidad en la Tierra. Hoy en día sabemos que las especies vegetales que producen flores polinizadas por animales se han diversificado mucho más que sus primas hermanas cuyas flores poliniza el viento. Las plantas con flor proporcionaron un nuevo nicho ecológico para los insectos, que se diversificaron, lo que a su vez facilitó la diversificación de las plantas. Plantas e insectos han ido de la mano y se han proporcionado oportunidades mutuas. De la misma manera, las interacciones entre plantas y animales frugívoros probablemente se originaron hace unos 300 millones de años, al inicio del Pérmico, con subsiguientes radiaciones adaptativas relacionadas con las interacciones en cuestión. Por tanto, este tipo de relación de dependencia mutua ha constituido un verdadero motor para la génesis de la diversidad orgánica.

La importancia de las relaciones mutualistas no escapó al ojo naturalista de Charles Darwin. Poco después de publicar su famoso *Sobre el Origen de las Especies*, Darwin dedicó un libro entero a las formas específicas por las que las orquídeas atraían a sus insectos polinizadores. Eso marcó el nacimiento de una

fecunda línea de investigación, con tanto éxito, que incluso permitió hacer una predicción de una naturaleza similar a la de los físicos que predijeron la existencia de Neptuno basándose en las perturbaciones de la trayectoria de sus planetas vecinos. *Angraecum sesquipedale* es una orquídea que se descubrió en Madagascar en tiempos de Darwin. Tiene una corola muy larga. Esta característica llevó a Darwin a predecir la existencia de un insecto polinizador con una trompa de una longitud similar. Fue sólo cuestión de tiempo encontrarlo. Se trata de una polilla, un esfíngido (*Xantophan morganipredicta*), cuya trompa tiene la increíble longitud de 40 cm. Este caso ilustra perfectamente la atención que han merecido las relaciones de ajuste perfecto entre un par de especies.

Ejemplos semejantes aparecen en las portadas de libros y emocionan al ser humano, pero seguramente son más la excepción que la regla. Las relaciones mutualistas no se restringen a pares independientes. En general, intervienen decenas e incluso cientos de especies, en tupidas redes de relaciones. Hasta hace poco, apenas sabíamos algo sobre la organización de esas redes de interdependencias, a pesar de que para entender cómo se organiza la vida en la Tierra y cuán frágil es dependemos en buena medida de conocer bien dichas redes.

El gran reto actual es entender cómo la biodiversidad, en su sentido global de red, responderá ante una variedad de perturbaciones: la pérdida de hábitat, las invasiones biológicas, la sobreexplotación de los recursos naturales o el cambio climático. Por ejemplo, ¿cómo afectará la extinción de una especie a estas redes de interdependencias? ¿Se verán afectadas sólo una o dos especies, o, por el contrario, iniciará una avalancha de coextinciones que se propagarán por toda la red? Para responder a ese elenco de cuestiones, decidimos formar equipo con nuestro colega Jens Olesen, de la Universidad de Aarhus, que había estudiado redes de polinización por todo el mundo.

Empezamos recopilando una extensa base de datos de redes mutualistas, tanto de polinización como de frugivoría. Y tomamos prestadas herramientas y conceptos que los físicos y sociólogos habían desarrollado para abordar problemas similares sobre otro tipo de



1. UNA GRAN PARTE DE LAS PLANTAS con flores requieren del concurso de animales, como este abejorro, para su polinización. El insecto traslada el polen de una flor a otra, requisito determinante para la reproducción exitosa de la planta; a cambio obtiene néctar, polen u otro tipo de recursos. Es una relación de mutuo beneficio.



2. LA POLINIZACION no es la única etapa del ciclo biológico de una planta que requiere del concurso de un animal. Muchas especies vegetales, más del 90 % en ecosistemas con una gran diversidad biológica (las selvas tropicales por ejemplo) dispersan sus semillas gracias a animales como esta *Tangara cyanocephala* de Brasil. A cambio, el ave consume la pulpa que rodea la semilla. De nuevo, ambas especies obtienen un beneficio.



redes (Internet o las interacciones entre empresas dentro de un mercado de transacciones económicas). Echemos un vistazo, antes de proseguir, a ese otro tipo de redes. Pasemos de las especies en un ecosistema a los servidores en Internet, de extinciones biológicas a errores en servidores y ataques cibernéticos.

La red Internet

En muchas facetas, nuestra vida se halla ahora entreverada con Internet, una red compleja de ordenadores que cubre el planeta y constituye el soporte material por donde fluye información de todo tipo. Sea para consultar un dato histórico, bajar música o comprar entradas para un evento deportivo, Internet no tiene par. La idea de unir ordenadores fue concebida a finales de los años sesenta del pasado siglo en el seno de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados, organismo estadounidense que controlaba la investigación militar. Se disponía de un conjunto de superordenadores incomunicados entre sí y se pensó en las ventajas de su interconexión. La idea pasó a las universidades y luego al uso público.

Internet adquirió vida propia y fue creciendo, autoorganizándose de forma parecida a un ser vivo. La evolución de Internet se basa en decisiones locales de necesidad inmediata. Ningún ingeniero lo ha diseñado; por su parte, las redes mutualistas son el producto de millones de años de evolución. ¿Qué arquitectura tiene esa red gigantesca? Y ¿hasta qué punto dicha arquitectura afecta a su robustez ante errores en servidores o ataques de piratas informáticos? Los investigadores empezaron por acudir a los modelos matemáticos de redes que por entonces se usaban, representaciones de redes muy sencillas que se dejaban tratar analíticamente.

Una mirada matemática

Paul Erdös fue un matemático singular. Tenía una capacidad de trabajo impresionante (solía definir a un matemático como una máquina que transforma café en teoremas) y le gustaba trabajar en equipo. Sin residencia fija y con un número mínimo de enseres personales, que cabían en una vieja maleta, se dedicaba a viajar por el mundo visitando amigos matemáticos a los que proponía colaborar en algún problema. Uno de los temas que despertó su interés fue la teoría de grafos, la descripción matemática de las redes. Junto a su colega Alfred Rényi definieron una serie de teoremas sobre grafos aleatorios, la representación más simple de una red.

La receta para construir una red o grafo aleatorio es muy sencilla. Se empieza con una serie de nodos (por ejemplo, ordenadores o genes). De esos nodos, se escogen dos al azar y se unen mediante un vértice o conexión (dos ordenadores conectados por cable o dos genes que se activan mutuamente). Se repite este paso básico un número determinado de veces. Al final de esa construcción aleatoria, se obtiene una red. Advertiremos que se trata de una red bastante homogénea, pues todos los nodos presentan un número de conexiones que no fluctúa demasiado alrededor de una media bien definida: la probabilidad de encontrar un nodo más conectado decrece muy rápidamente con el número de conexiones. En este tipo de red no existen nodos hiperconectados.

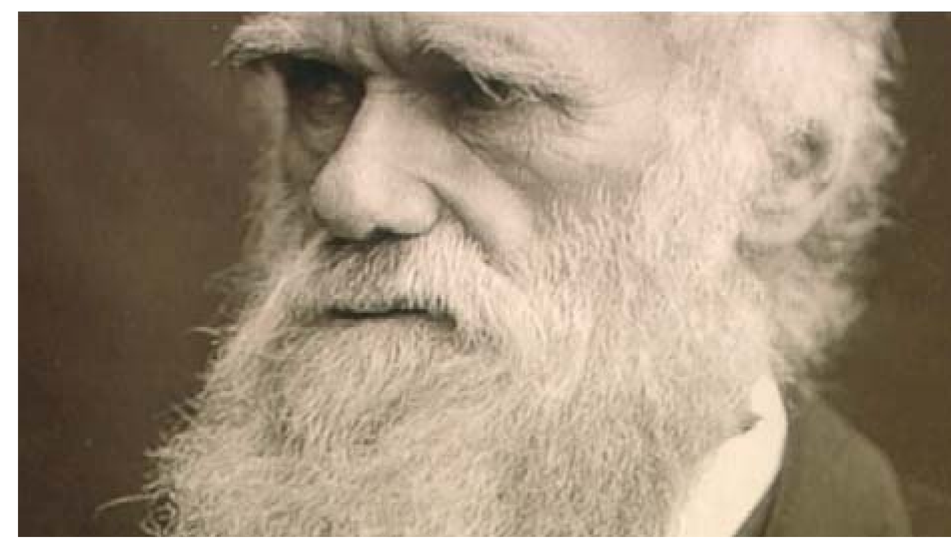
Hace unos pocos años, cuando los físicos comenzaron a ocuparse de redes complejas, como Internet, descubrieron que no había tal homogeneidad en las redes abordadas. Antes bien, las redes reales se revelaban mucho más heterogéneas; aunque la mayoría de los nodos tenían un número pequeño de conexiones, algunos estaban mucho más conectados de lo que cabía esperar del azar. En Internet, no todos los servidores tenían la misma importancia; algunos eran verdaderos "concentradores", con cientos o miles de conexiones. En este caso, el número medio de conexiones por nodo da muy poca información; la varianza es demasiado grande. Distribuciones tan heterogéneas recuerdan a las que describen la distribución de recursos económicos por persona, con una diferencia abismal entre los pobres y unos pocos multimillonarios.

Poco a poco se empezó a estudiar otras redes complejas. Así, las redes de interacciones genéticas. En éstas se representa qué genes,

mediante proteínas, activan a qué genes en una red de regulación que es fundamental para el desarrollo de un organismo. La red de regulación puede considerarse el mapa de la vida, cuyo funcionamiento no puede reducirse a las moléculas constituyentes. Entender esta red de regulación es vital para combatir enfermedades genéticas. La célula, en cierta medida, funciona como Internet.

Otro tipo de redes que habían sido analizadas por los ecólogos desde hacía tiempo eran las redes tróficas, que representan quién se come a quién en un ecosistema. Los ecólogos se adelantaron al trabajo de los físicos. Ya habían introducido una serie de conceptos y medidas que éstos reinventarían años más tarde. La mayoría de esas nuevas redes estudiadas presentaba de nuevo una distribución muy heterogénea de interacciones. Independientemente de que en cada red la identidad de los nodos fuera diferente, todas ellas compartían un patrón arquitectónico, tal vez el reflejo de un proceso similar de crecimiento. Los físicos, acostumbrados a buscar procesos generales, abandonaron el modelo de red aleatoria de Erdös y Rényi, ya que no describía esta característica ubicua de las redes complejas. Había que sustituirlo por otro modelo. ¿Cómo generar de forma simple redes tan heterogéneas?

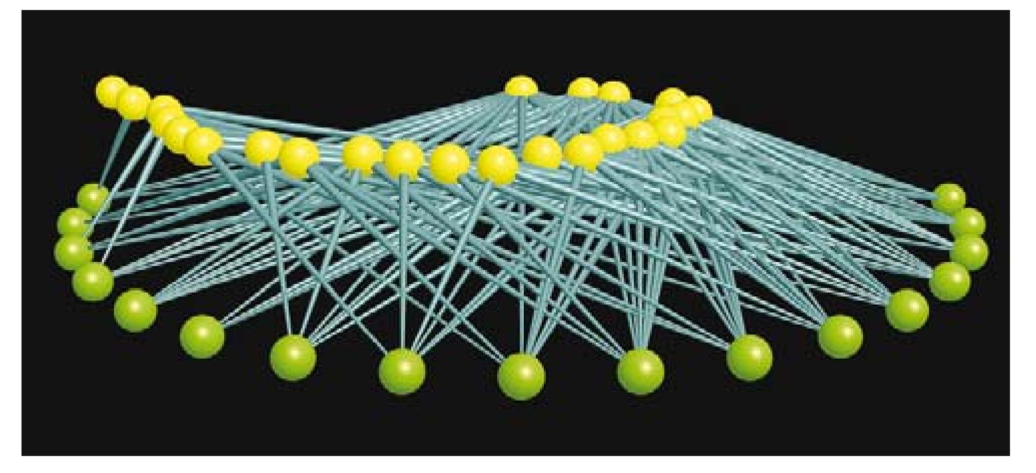
Albert-László Barabási, profesor del departamento de física de la Universidad de Notre Dame en Indiana, junto a su doctoranda Réka Albert, pensaron en un mecanismo muy sencillo para reproducir la estructura de Internet y otras redes heterogéneas. Imagine el lector que disponemos de un conjunto de nodos iniciales y que, en cada iteración, se añade a la red un nuevo nodo que se conecta a otro nodo preexistente, escogido con una probabilidad proporcional a su número de interacciones. Este es un proceso del tipo "los ricos se hacen todavía más ricos" (o principio de san Mateo), un proceso multiplicativo muy frecuente en los sistemas biológicos. Si se repite esta operación un número de veces suficientemente grande, al final se observará una red tan heterogénea como las redes reales. Es ésta, pues, una receta fácil para obtener redes complejas, conocida por "modelo de conexión preferencial". Llegado aquí, Barabási se cuestionó: ¿Cuál es la implicación de esta distribución heterogénea de interacciones para la estabilidad de las redes generadas?



3. CHARLES DARWIN, el padre de la teoría de la evolución por selección natural, estaba fascinado por el grado de convergencia entre la morfología de algunas orquídeas y la de los insectos polinizadores. Tres años después de publicar su famoso libro sobre el origen de las especies, escribió otro dedicado a esa cuestión.

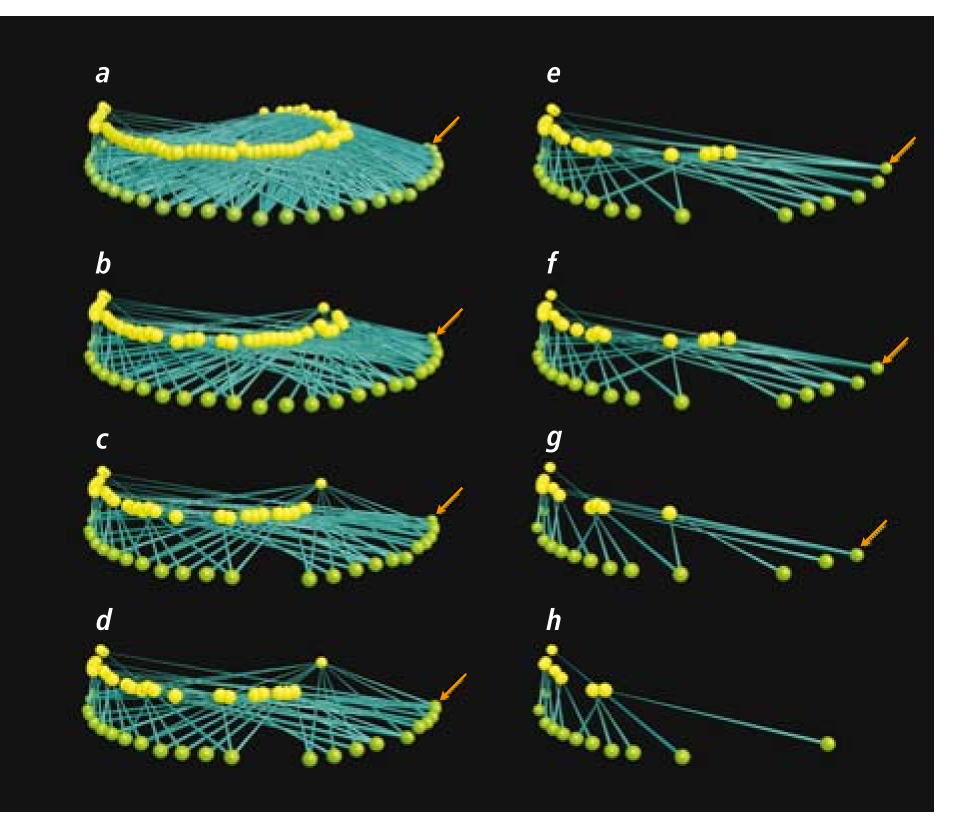
El talón de Aquiles

En un influyente artículo publicado en 2000, Barabási, Albert y el investigador posdoctoral



JORDI BASCOMPTE Y PEDRO JORDANO; IMAGEN PRODUCIDA CON FOODWEB3D (www.foodwebs.org)

4. LAS INTERACCIONES MUTUALISTAS entre las plantas y los animales que las polinizan o dispersan sus frutos tejen redes de interdependencia complejas y semejantes a la que se ve en esta ilustración. Corresponde a la comunidad de plantas y polinizadores de una localidad de Groenlandia estudiada por Jens M. Olesen. Cada nodo verde representa una especie vegetal; cada nodo amarillo, una especie animal. Un insecto y una planta están conectados mediante un enlace si el primero poliniza a la segunda. Estas redes complejas representan la arquitectura de la biodiversidad, ya que sin la presencia de tales interacciones resultaría imposible la persistencia de las especies que componen la comunidad.



5. LA ARQUITECTURA DE LAS REDES MUTUALISTAS determina en gran medida cuál va a ser la consecuencia de la extinción de especies. En este ejemplo, correspondiente a la comunidad ilustrada en la figura anterior, se va eliminando sucesivamente una especie vegetal (*señalada con la flecha*). Se empieza con la planta más generalista. Se da por supuesto que las especies de plantas y animales que se quedan sin ninguna conexión se extinguen. Como puede apreciarse, la extinción de unas pocas especies estrechamente conectadas puede ejercer efectos catastróficos para la red resultante. La arquitectura de estas redes mutualistas determina en gran medida cómo se propagan las perturbaciones.

Hawoong Jeong ilustraron de forma gráfica de qué modo afecta a Internet la distribución heterogénea de sus interacciones. Partieron de una red aleatoria del estilo de las estudiadas por Erdös y Rényi, y fueron eliminando un número progresivamente mayor de nodos para ver cómo quedaba la red resultante. Emplearon dos estrategias distintas para eliminar nodos. En primer lugar, los escogieron al azar. Se simulaba lo que un ingeniero llamaría error aleatorio de un servidor. La segunda estrategia consistía en un ataque dirigido. Simulaba lo que haría un pirata informático destructivo, que no derribaría cualquier servidor, sino que iría por el más conectado, para causar el mayor daño posible.

Barabási y su equipo observaron que las redes aleatorias, con su distribución de interacciones homogénea, eran siempre muy frágiles ante los errores estocásticos. Bastaba que se eliminase una pequeña fracción de nodos para que se fragmentara en subredes desconectadas entre sí. Pero la situación era muy diferente cuando la red de partida mostraba una distribución heterogénea de interacciones, como la observada en Internet. Si la eliminación de nodos se realizaba al azar, la red se mantenía intacta, aun cuando se eliminara una fracción importante de nodos. Era una red muy robusta ante la caída aleatoria de servidores. La razón hay que buscarla en los concentradores, nodos altamente conectados que aglutinan toda la red a su alrededor. Como son pocos, es improbable escogerlos al azar. En cambio, si se empezaba eliminando el nodo más conectado, y así sucesivamente, la red se mostraba muy, muy frágil: bastaba la eliminación de unos pocos de estos concentradores muy conectados para que la red se fragmentara. Los concentradores, que proporcionan robustez frente a fallos aleatorios, constituyen a su vez el talón de Aquiles de Internet cuando sufre ataques dirigidos.

La red de la biodiversidad

Inspirados por los estudios sobre la estructura de Internet y otras redes complejas, nos propusimos buscar patrones arquitectónicos universales en nuestras redes mutualistas. El primer paso consistió en caracterizar su grado de heterogeneidad, como los físicos habían hecho con Internet y otros ecólogos con redes de dependencia trófica. Computamos las distribuciones de conectividad, es decir, con qué probabilidad una planta, por ejemplo, es polinizada por una, dos,... *n* especies de insectos. ¿Serían las distribuciones de frecuencias de conectividades, en nuestras redes mutualistas, similares a las encontradas en otras redes complejas, como Internet?

El patrón que observamos fue muy general y robusto. En la mayoría de los ejemplos, la heterogeneidad de las redes biológicas se acercaba a la de otras redes complejas. Exhibían, pues, una amplia variabilidad en el número de interacciones por especie. Aunque la mayoría de las especies sólo interaccionaban con un grupo restringido de otras especies, las había altamente generalistas, mucho más conectadas de lo esperado en un modelo aleatorio. No obstante, en comparación con Internet y otras redes tecnológicas, había una probabilidad ligeramente más pequeña de encontrar especies altamente conectadas. Los matemáticos dirían que las distribuciones de conectividad estaban truncadas para valores muy elevados; es decir, a partir de cierto grado de conectividad disminuía la probabilidad de encontrar especies con un nivel superior de generalización.

Las redes mutualistas, al ser mucho más heterogéneas que una red aleatoria, se muestran más robustas ante la extinción de especies al azar. Al no alcanzar el grado de heterogeneidad de otras redes complejas, tampoco adolecen de su fragilidad ante pérdida de las especies más generalistas. Las redes mutualistas parecen, pues, tener lo mejor de ambos mundos.

¿Cuál es la razón de que las distribuciones de conectividades estén truncadas? Se han avanzado varias explicaciones, complementarias. Explicitemos la nuestra: así como no hay, en principio, razón por la que dos servidores no puedan estar unidos en Internet, algunos

JORDI BASCOMPTE Y PEDRO JORDANO; IMAGEN PRODUCIDA CON FOODWEB3D (www.foodwebs.org)

pares planta-animal no pueden interaccionar. Existen interacciones prohibidas, así las llamamos. Por ejemplo, un insecto no puede polinizar una planta si es un inmigrante que llega al ecosistema pasada la época de floración del vegetal; ni una especie de ave pequeña puede dispersar una especie de planta cuyos frutos excedan el tamaño de las comisuras bucales del pájaro. Estas conexiones prohibidas reducen la probabilidad de que incluso los altamente generalistas puedan interaccionar con todas las especies, limitando así la frecuencia de especies con un número muy elevado de interacciones.

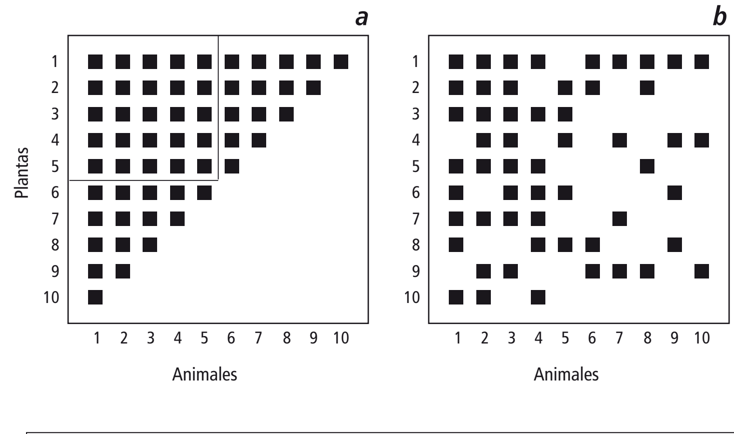
Muñecas rusas

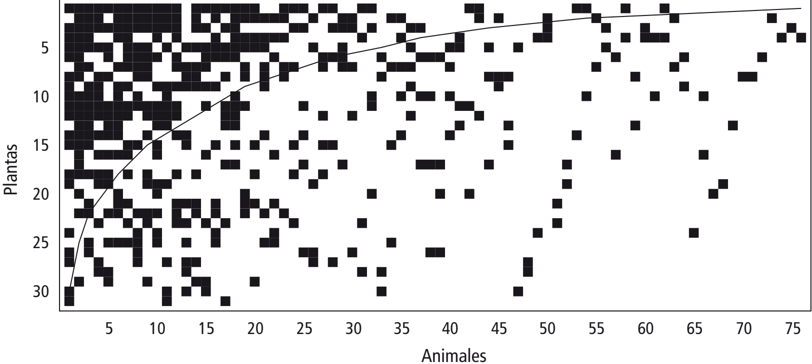
La distribución del número de conexiones por especie es sólo un primer paso para entender la arquitectura de las redes mutualistas. Esta distribución nos permite determinar, por ejemplo, cuál es el número medio de interacciones por especie, pero no contiene información sobre la identidad de las interacciones. Por botón de muestra, desconocemos si los frugívoros que dispersan las semillas de una especie de planta son los mismos que los que dispersan otra especie o si difieren. Nuestro grupo, con la incorporación de Carlos J. Melián, doctorando de uno de los autores, tomó prestado para este caso el concepto de "distribución encajada", de uso en ecología de islas. En una distribución encajada, las especies que sólo mantienen relaciones especializadas muestran predilección por interaccionar con especies generalistas. Más exactamente, si ordenamos a las especies de plantas de la más especialista a la más generalista, vemos que, en general, las especies animales con las que interaccionan se hallan incluidas en conjuntos cada vez mayores, como si se tratara de muñecas rusas unas dentro de otras; de ahí el apelativo de "encajadas" que se da a estas redes.

De esta distribución encajada se derivan dos propiedades importantes. Primero, existe un núcleo en la red, constituido por un número pequeño de plantas y animales generalistas que interaccionan entre sí. Se genera una estructura redundante, con una fracción elevada de interacciones del total. Este núcleo es robusto ante la pérdida de algunas de sus interacciones y, por tanto, proporciona rutas alternativas para los flujos de materia y energía. Desde el punto de vista de la coevolución, esas pocas especies actúan como un vórtice coevolutivo que puede determinar la dirección coevolutiva de la red entera.

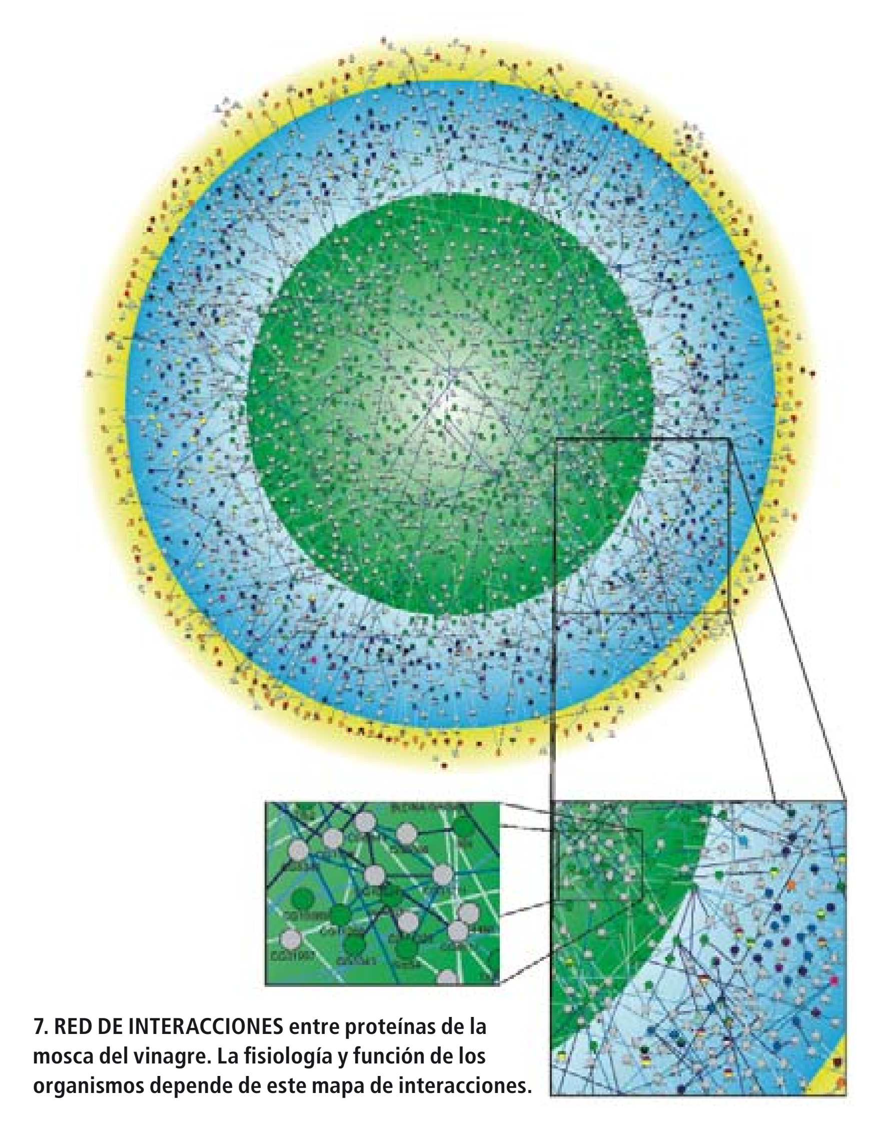
En segundo lugar, en una red encajada la especialización es asimétrica. Las especies especialistas de uno de los conjuntos (por ejemplo, el de los animales) tienden a interaccionar sólo con las generalistas del otro conjunto. Ese fenómeno confiere mecanismos de persistencia para los especialistas, ya que los generalistas de los que dependen suelen ser más abundantes y menos fluctuantes, al contar con muchos y diversos recursos. Por lo tanto, la propiedad encajada de las redes creadas las hace, tal parece, más robustas. Para analizar esas implicaciones dinámicas con más detalle, se requiere el uso de modelos matemáticos y simulaciones con ordenador.

La teoría existente se ceñía a la descripción de un par de especies que interaccionan de forma muy predeterminada. Un primer paso para desarrollar modelos de redes mutualistas lo dio Miguel Angel Fortuna, doctorando de uno de los autores. Fortuna elaboró un modelo dinámico que describe exactamente la red de interacciones de una comunidad. Lo comparó con un modelo nulo similar: con las mismas especies e interacciones, aunque estas últimas asignadas al azar. Se buscaba entender hasta qué punto resultaba determinante la arquitectura de las redes ante las alteraciones, ante la destrucción del hábitat y la pérdida de especies. El trabajo teórico de Fortuna estableció que la heterogeneidad y la naturaleza encajada de las redes mutualistas las hacía más resistentes a la pérdida de hábitat. Aunque algunas especies se extinguen antes, la red mantiene su funcionalidad hasta valores de destrucción mayores.





6. EN ESTAS GRAFICAS, las cifras numeran especies de plantas y de animales y los cuadros negros, la existencia de una relación mutualista entre la planta y el animal correspondientes. La gráfica *a* representa una red de relaciones encajada perfecta (el cuadrado delimita el núcleo de la red, todos cuyos miembros se relacionan unos con otros), la *b* una red aleatoria y la *c* una red auténtica entre plantas y polinizadores (en una red encajada perfecta, todos los cuadros negros estarían a la izquierda de la curva).



7. RED DE INTERACCIONES entre proteínas de la mosca del vinagre. La fisiología y función de los organismos depende de este mapa de interacciones.

FIGURA ORIGINALMENTE PUBLICADA EN *NATURE* POR GIOT Y COLABORADORES

De forma similar, Jane Memmott, de la Universidad de Bristol, junto a Nickolas Waser y Mary Price, ambos en la Universidad de California en Riverside, han repetido en dos redes de polinización los experimentos de eliminación secuencial de nodos en Internet y otras redes ecológicas. Se proponían simular las consecuencias del declive general en la población de polinizadores. Para ello, los fueron eliminando progresivamente, del más especialista al más generalista, y observaron cómo se propagaban dichas extinciones por la red mutualista. Estas redes mutualistas se manifestaron bastante robustas ante los procesos de extinción, lo que, una vez más, se atribuyó a su alta heterogeneidad y a su carácter encajado. La arquitectura de tales redes mutualistas las hace, pues, más robustas ante los efectos perniciosos de las extinciones.

Convergencia y complementariedad

El hecho de que estas redes mutualistas sean encajadas puede sorprender a algunos biólogos evolutivos, porque la teoría esperaba encontrar compartimentos, grupos de especies que interaccionasen de forma muy característica y generados mediante especialización paralela. Sin embargo, las redes encajadas son mucho más cohesivas. John N. Thompson, de la Universidad de California en Santa Cruz, ha visto en esta estructura encajada la consecuencia de dos fuerzas coevolutivas: la complementariedad y la convergencia. La longitud de la corola de una flor ha de ser complementaria con la longitud de la trompa de un polinizador para que se produzca una interacción mutuamente beneficiosa entre ambas especies. A esta interacción pueden añadirse otras especies, por el mecanismo de convergencia de caracteres. Así, diversas especies vegetales convergerían a la morfología de la planta original para beneficiarse del concurso del polinizador y viceversa.

Las dos fuerzas coevolutivas reseñadas difieren a buen seguro de las que se dan en redes antagonistas; verbigracia, las establecidas entre plantas e insectos herbívoros. En estas interacciones antagonistas, se desatan "carreras de armamentos" coevolutivas. Vale decir: los grupos de plantas desarrollan una sustancia defensiva que les permite escapar de la herbivoría. Andando el tiempo, la selección natural hará que un grupo de insectos desarrolle una contradefensa y pueda alimentarse de dicho grupo de plantas. Así se generarán grupos de especies en mutua interacción, aunque más o menos aislados de otros grupos.

Para someter a prueba estos diferentes modos de organización hemos contado con la colaboración de Thomas Lewinsohn, de la Universidad estatal de Campinas, quien ha venido estudiando redes de interacciones antagonistas entre plantas e insectos herbívoros. Con la comparación entre estos dos tipos de interacciones coevolutivas podremos avanzar en nuestra compresión de los mecanismos que conducen a esos patrones. Los resultados preliminares apuntan a que las redes antagonistas presentan otro tipo de organización: en su mayor parte, se hallan estructuradas en compartimentos y no se encuentran, por tanto, tan cohesionadas como las redes mutualistas. Pero siempre cabe observar estructuras mixtas, y los compartimentos pueden, a su vez, estar organizados de forma encajada.

Dependencias débiles y asimétricas

Hasta ahora hemos descrito la estructura de las redes mutualistas utilizando información binaria, es decir, considerando que una planta y un animal o bien interaccionan o bien no interaccionan. Pero falta cuantificar la fuerza de tales interacciones. ¿Son las interacciones fuertes por lo general? ¿Son mayoritariamente

débiles? ¿Son muy heterogéneas, como sucedía con el número de interacciones por especie?

De esas cuestiones nos ocupábamos ya en un artículo que publicamos en *Science* en abril de 2006. Exponíamos, en primer lugar, que la fuerza de las interacciones mutualistas, es decir, el grado de dependencia recíproca entre pares de especies animal-planta, resultaba muy heterogénea: muy débil en la mayoría de los pares de especies y, en unos pocos, muy fuerte. Ese patrón coincidía con el que se había observado para redes tróficas y para otros tipos de redes abióticas, como las redes de aeropuertos y las de coautoría de trabajos científicos.

En segundo lugar, se trataba de interacciones asimétricas. Si una planta, sea por caso, depende mucho de un polinizador, éste apenas depende de la planta. Las interacciones de dependencia recíproca fuerte resultaron muy escasas. La conjunción de interacciones débiles y asimétricas favorecen, presumiblemente, la persistencia de las especies en la comunidad. Si cada especie de cada par que interacciona dependiera fuerte y simétricamente de la otra especie, una disminución poblacional en una de las especies comportaría la reducción de la otra, lo que a su vez dificultaría la recuperación de la primera. Este tipo de efecto en cascada hacia la extinción resulta mucho más improbable cuando hablamos de interacciones débiles y asimétricas. Una argumentación que cobró mayor consistencia teórica al introducir las predicciones de un sencillo modelo matemático.

Dada la estructura de las redes mutualistas descrita anteriormente, y consideradas las potenciales implicaciones que tiene para la persistencia de la biodiversidad, cabe preguntarse por los mecanismos ecológicos, evolutivos y coevolutivos que producen estos patrones de red. Una primera aproximación nos la ofrece, lo hemos adelantado, el estudio de modelos de crecimiento de redes. La teoría constituye aquí una pieza importante del rompecabezas que estamos armando porque nos permite explorar posibilidades que serían muy difíciles de acometer mediante observaciones de campo o experimentos en el laboratorio.

Paulo R. Guimarães, entonces doctorando de uno de los autores y hoy investigador posdoctoral en el Instituto de Física de la Universidad estatal de Campinas, estudió modelos parecidos al de interacción preferencial que habían diseñado los físicos. A partir de ellos podían explicarse algunos patrones observados en estas redes: a través de mecanismos muy generales de crecimiento de la red. Pero con ese enfoque se nos ofrece sólo una parte de la información. Para entender mejor los procesos biológicos que llevan a redes con estructura encajada y dependencias débiles y asimétricas, hemos de determinar qué características ecológicas tienen las distintas especies que tejen la red y su relación evolutiva. En otras palabras, hasta entonces habíamos considerado las redes coevolutivas como si todas las especies fueran idénticas, divergentes sólo en número de interacciones y distintas en función de con quién interaccionaban. Se trataba ahora de adornar cada uno de los nodos con características propias de esa especie.

Filogenias y ecología

¿Hasta qué punto la historia evolutiva de las plantas y los animales condiciona la arquitectura de las redes mutualistas? Para abordar la cuestión necesitábamos una herramienta estadística, el "método comparado", que tiene en cuenta el parentesco entre especies, su proximidad en el árbol filogenético. Se parte del supuesto de que las especies no son entidades independientes entre sí, sino que poseen una historia común.

Enrico Rezende acababa de doctorarse en la Universidad de California en Riverside; tenía experiencia con este tipo de contrastes filogenéticamente independientes. Desde que se unió a nuestro grupo como investigador posdoctoral, su trabajo ha demostrado que en casi la mitad de las grandes redes hay una señal filogenética significativa para el número de interacciones por especie e importante para saber con quién se interacciona. Dicho de otro modo: las especies filogenéticamente

8. LA FIGURA REPRESENTA LAS CONEXIONES entre servidores en Internet. En este caso, cada nodo representa un servidor; dos servidores están unidos si media una conexión física que les permite comunicarse. Algunas propiedades de las redes de interacciones de plantas y animales son similares a las observadas en sistemas muy dispares, como Internet.

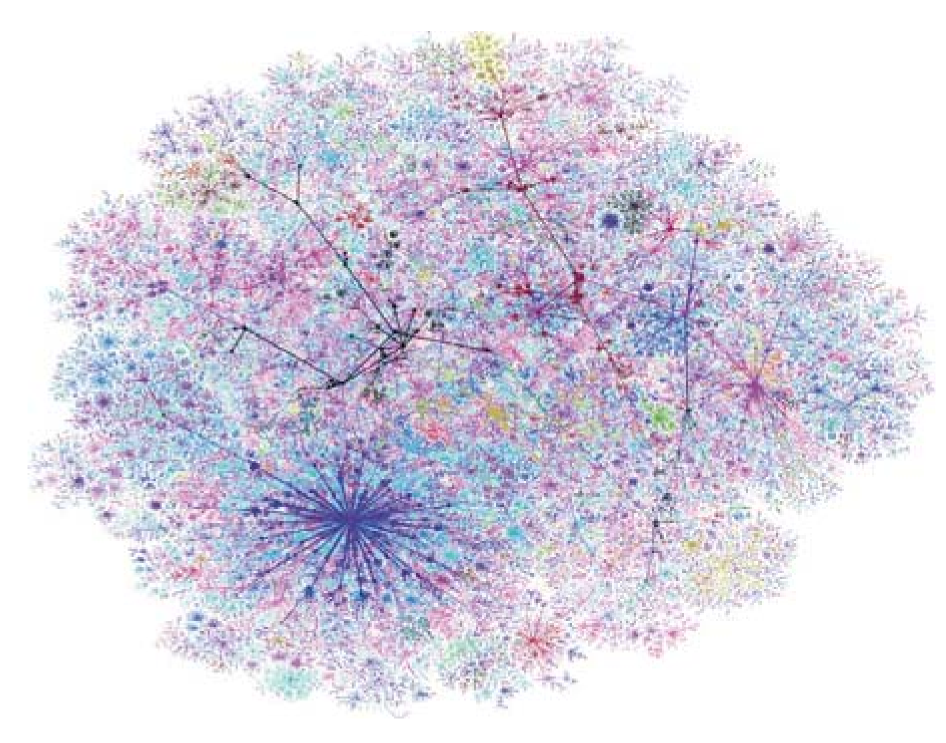


FIGURA ORIGINALMENTE REALIZADA POR WILLIAM R. CHESWICK (http://www.cs.bell-labs.com/~ches/map/)

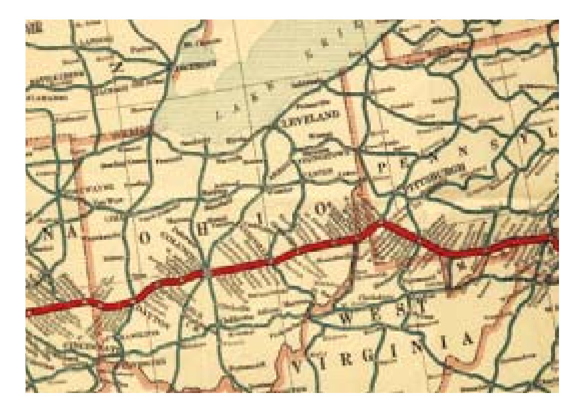
Los autores

Jordi Bascompte y **Pedro Jordano** son profesores de investigación de la Estación Biológica de Doñana, un centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC. Bascompte se doctoró por la Universidad de Barcelona y posteriormente fue investigador posdoctoral en la Universidad de California en Irvine y en el Centro Nacional para la Síntesis y el Análisis Ecológicos (NCEAS), ambos en EE.UU. Ha sido galardonado con el Premio Europeo de Jóvenes Investigadores (EURYI). Jordano se doctoró en la Universidad de Sevilla y es profesor invitado regularmente en diversas universidades en Brasil, Suecia y EE.UU. Juntos han formado el Grupo de Ecología Integrativa y estudian procesos ecológicos y evolutivos desde una perspectiva multidisciplinar.

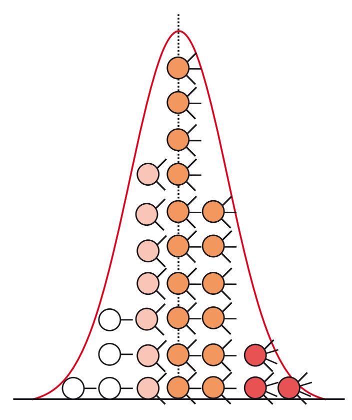
emparentadas tienden a tener un papel similar en la red.

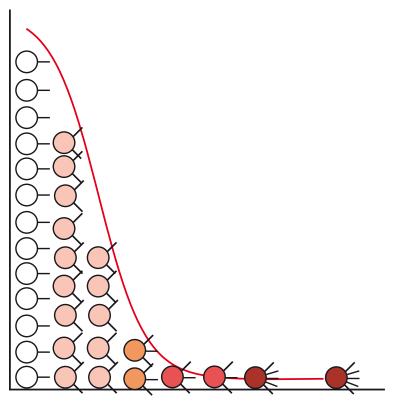
La arquitectura de las redes mutualistas no puede, pues, explicarse exclusivamente mediante caracteres inmediatos, como la adaptación o la abundancia local de las especies. La historia evolutiva permite interpretar los patrones de las redes creadas. Desde la perspectiva de la conservación de la biodiversidad, significa que las avalanchas de extinciones, subsiguientes a la extinción de una determinada especie, afectarán a especies emparentadas, ya que todas ellas tienden a interaccionar con el mismo conjunto de especies. En ese proceso se va podando el árbol taxonómico de una forma sesgada y, por tanto, cae la riqueza taxonómica de un modo más drástico de lo que cabría esperar. Tal y como demostrábamos en un artículo publicado en *Nature* en agosto de 2007, las extinciones no se limitan a eliminar especies; borran páginas enteras de la historia evolutiva.

Los patrones arquitectónicos de las redes mutualistas pueden venir explicados por múltiples factores. Sabemos ya que hay un componente histórico, pero eso no excluye ningún mecanismo causal. Características ecológicas, como el tamaño corporal de las especies o su forma de vida, podrían dar cuenta de los patrones arquitectónicos observados. Para comprobar qué mecanismos guardan una correlación más estrecha con los patrones de interacción, recurrimos a análisis que tenían en cuenta la filogenia y analizaban diversos factores ecológicos. De estos análisis se concluye que la fenología (en qué épocas del año una especie está presente), la



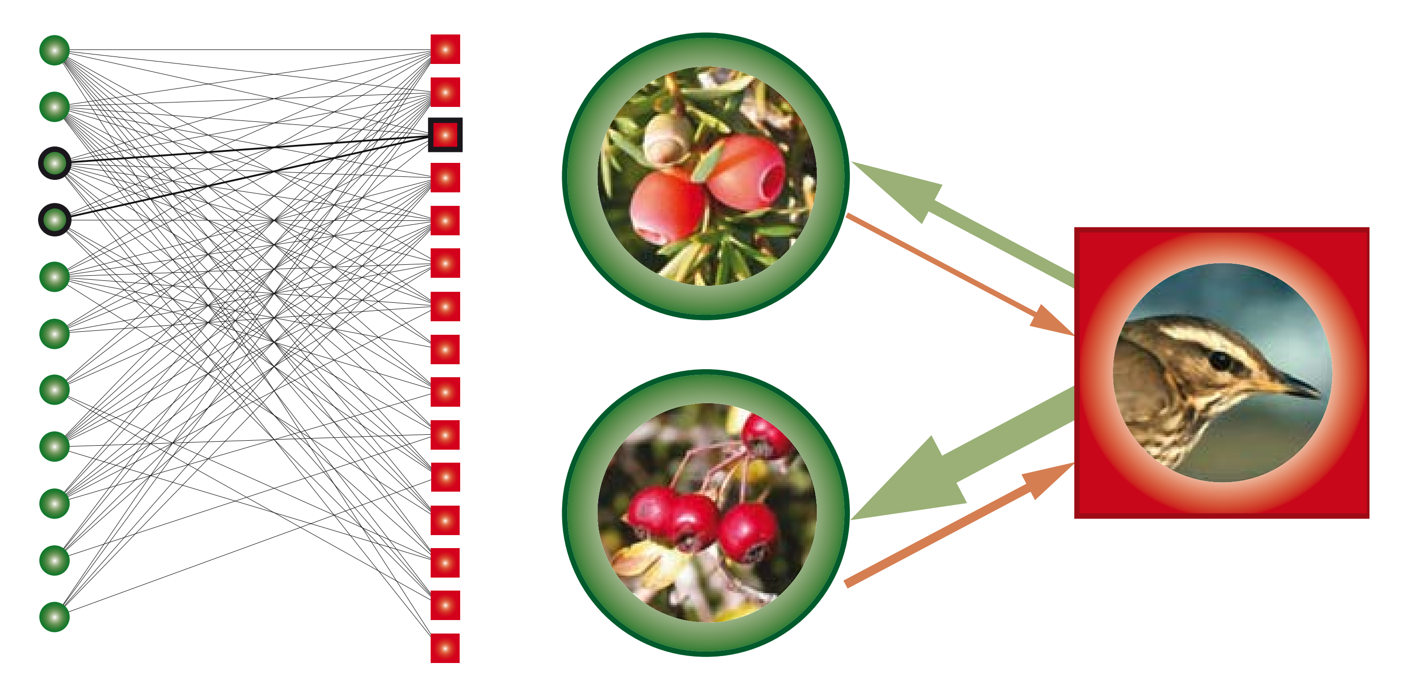






9. DOS REDES CON PROPIEDADES MUY DISTINTAS. A la izquierda, la conexión interurbana por carretera en el este de EE.UU. a finales del siglo XIX. A la derecha, las conexiones entre aeropuertos en Brasil servidas por la aerolínea VARIG. La distribución del número de conexiones por nodo es muy diferente entre ellas. La red de carreteras ilustra una red con un patrón aleatorio de enlaces entre nodos; la mayoría de las poblaciones cuenta con un número similar de conexiones. La red queda bien caracterizada por el número medio de conexiones por nodo, que en redes aleatorias sigue una distribución normal —es decir, acampanada— alrededor de una media característica. En cambio, la red de vuelos entre aeropuertos no tiene un número medio de conexiones por nodo que le sea característico: existen nodos estrechamente conectados (los grandes aeropuertos) y otros con muy pocas conexiones, casi siempre con los grandes aeropuertos. Aquí la distribución de conexiones por nodo es muy heterogénea, con colas largas (la probabilidad de un número de conexiones mucho mayor o menor que la media no disminuye muy deprisa). Muchas redes complejas, incluidas las mutualistas, Internet y las redes de regulación génica siguen estas pautas de conexión, muy diferentes de las que cabía esperar en las redes aleatorias descritas por Erdös.

JORDI BASCOMPTE Y PEDRO JORDANO



10. LAS REDES MUTUALISTAS SON MUY HETEROGENEAS (la mayoría de las especies interaccionan con otras pocas especies, pero unas pocas especies están mucho más conectadas de lo que se esperaría del azar), encajadas (los especialistas interaccionan con subconjuntos bien definidos de las especies que interaccionan con los generalistas, en forma de muñecas rusas introducidas unas dentro de otras) y construidas mediante dependencias débiles y asimétricas (si una planta depende mucho de un animal, el animal apenas dependerá de esa planta).

JORDI BASCOMPTE Y PEDRO JORDANO

amplitud de la distribución geográfica y la abundancia local predicen bien el número de interacciones por especie. Por lo tanto, los patrones arquitectónicos de las redes mutualistas pueden explicarse mediante una combinación de factores, tanto históricos como contemporáneos.

En resumen, las interacciones mutualistas desarrolladas en la naturaleza tejen redes complejas caracterizadas por una topología bien definida y universal. Se trata de redes muy heterogéneas, cohesionadas y basadas en dependencias débiles y asimétricas entre las especies. Con independencia del tipo de mutualismo estudiado (polinización o dispersión de las semillas), de la localidad geográfica, de las especies componentes y de otras variaciones, todas las redes presentan un patrón común. Estos patrones de red desempeñan un papel muy importante para la persistencia de las especies y, por tanto, construyen la arquitectura de la biodiversidad. Estos resultados ilustran las relaciones entre la estructura y la robustez de estas redes complejas, y pueden ser a la vez de interés para científicos que trabajan con otros tipos de redes. Por ejemplo, en una reunión de expertos organizada por la Reserva Federal de Nueva York con el objetivo de evaluar la estabilidad de la red de préstamos entre bancos de los EE.UU., se discutieron los patrones de las redes mutualistas y se buscaron sus equivalentes en la red económica (*Ecology for bankers,* en *Nature*). Esto resalta la naturaleza interdisciplinaria de estos estudios.

La arquitectura no puede descomponerse en el estudio de pares de especies, como tampoco podemos entender el desarrollo embrionario sólo estudiando genes aislados. Entender la organización de estas interacciones como redes complejas de interdependencia, en lugar de limitarse a pares aislados de especies, puede ayudarnos a comprender con mayor hondura las condiciones por las que se sustenta la vida.

A menudo equiparamos la biodiversidad al número de especies que existe en un ecosistema, en una selva tropical por ejemplo. Pero existe otro componente de pareja relevancia, la forma en que interaccionan las especies implicadas. La desaparición de las interacciones resulta tan perjudicial y presenta efectos de tan largo alcance, comenta Daniel H. Janzen, de la Universidad de Pennsylvania, como la extinción de las especies. Si lo que otorga a un móvil de Alexander Calder una sensación de ingravidez característica es la forma en que los elementos componentes se hallan interrelacionados, aquí las interacciones entre plantas y animales adquieren una arquitectura bien definida, un estilo particular inconfundible, que influye en la persistencia de una comunidad biológica sujeta a perturbaciones.

Bibliografía complementaria

INVARIANT PROPERTIES IN COEVOLUTIONARY NETWORKS OF PLANT-ANIMAL INTERACTIONS. Pedro Jordano et al. en *Ecology Letters*, vol. 6, págs. 69-81; enero 2003.

THE NESTED ASSEMBLY OF PLANT-ANIMAL MUTUALISTIC NETWORKS. Jordi Bascompte et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 100, págs. 9383-9387; agosto 2003.

THE GEOGRAPHIC MOSAIC OF COEVOLUTION. John N. Thompson. Chicago University Press, 2005.

ASYMMETRIC COEVOLUTIONARY NETWORKS FACILITATE BIODIVERSITY MAINTENANCE. Jordi Bascompte et al. en *Science*, vol. 312, págs. 431-433; abril 2006.

SPECIALIZATION AND GENERALIZATION IN PLANT-POLLINATOR INTERACTIONS. Dirigido por Nicolas Waser y Jeff. Ollerton. University of Chicago Press, 2006.

PLANT-ANIMAL MUTUALISTIC NETWORKS: THE ARCHITECTURE OF BIODIVERSITY. Jordi Bascompte y Pedro Jordano en *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 38, págs. 567-593; 2007.



El misterio de Tunguska

Hace cien años, un objeto celeste arrasó más de dos mil kilómetros cuadrados de taiga siberiana. Quizá se haya dado con un fragmento de ese objeto

Luca Gasperini, Enrico Bonatti y Giuseppe Longo

Siberia Central. A las 7:14 de la mañana del 30 de junio de 1908, Semen Semenov, campesino, vio que "el cielo se partía en dos. En lo alto, sobre el bosque, se extendió un fuego... De donde ardía el fuego llegaba un fuerte calor... Entonces el cielo se cerró, y se oyó un fuerte estampido, y salí despedido unos cuantos metros... Tras eso, vino mucho ruido, que parecía... de cañonazos, la tierra temblaba...".

Esta es la narración de uno de los testigos más cercanos del suceso de Tunguska, el mayor impacto de un cuerpo cósmico sobre la Tierra en la historia reciente de la humanidad. Semenov presenció la estruendosa detonación a unos 65 kilómetros de donde se produjo. Los efectos alcanzaron el lejano norte de Europa y el centro de Asia. Algunos observaron sobre el horizonte inmensas nubes plateadas y brillantes ocasos llenos de color. Otros, cielos por la noche luminiscentes: los londinenses pudieron leer la prensa a medianoche sin luz artificial. Los observatorios geofísicos acotaron en una remota región de Siberia el origen de estas anomalías gracias a las ondas sísmicas y de presión. El epicentro se hallaba cerca del río Podkamennaya Tunguska, en una zona de taiga pantanosa deshabitada, que permanece helada 8 o 9 meses al año.

JAMES PORTO

UNA GIGANTESCA BOLA DE FUEGO fue la primera señal de que un objeto celeste penetraba en la atmósfera terrestre y explotaba sobre Siberia.

Los autores

Luca Gasperini, **Enrico Bonatti** y **Giuseppe Longo** llevan estudiando el misterio de Tunguska muchos años. Gasperini se halla adscrito al Instituto de Ciencias del Mar de Bolonia. Bonatti es catedrático de geodinámica en la Universidad de Roma "La Sapienza" y científico del Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty, de la Universidad de Columbia. Longo ocupa una cátedra de física de la Universidad de Bolonia.

Desde el evento de Tunguska, científicos y aficionados se han preguntado por su causa. Aunque la mayoría, en general, coincide en que algún tipo de objeto cósmico, ya fuese un asteroide o un cometa, explotó en el cielo de Siberia, hasta el momento no se ha hallado en la zona afectada ni un solo fragmento del cuerpo, ni un cráter abierto por el impacto. El misterio continúa sin resolverse, aunque nuestro equipo de investigadores, los últimos en la ininterrumpida serie de cuantos han escrutado la región, podría estar a punto de culminar un descubrimiento que cambiaría nuestra idea de qué sucedió aquella mañana.

El estudio del evento de Tunguska es importante porque las colisiones con cuerpos extraterrestres han tenido efectos muy importantes en la evolución de la Tierra. Hace unos 4400 millones de años, un planetoide del tamaño de Marte colisionó con nuestro joven planeta. Los escombros expelidos formaron la Luna. Un gran impacto podría haber provocado la extinción de los dinosaurios hace 65 millones de años. Siguen produciéndose impactos cósmicos: en julio de 1994 se observó el espectacular choque de un cometa con Júpiter; en septiembre del año pasado, un objeto celeste cruzaba el cielo sobre el altiplano de Perú, aterrizaba con un fuerte estruendo en el término de Carancas y excavaba un agujero de 4,5 metros de profundidad y 13 metros de diámetro.

Gracias a las observaciones por satélite de las fulguraciones de meteoritos en la atmósfera (las "estrellas fugaces") y a los datos acústicos asociados a los impactos cósmicos sobre la superficie de la Tierra, Peter Brown y sus colaboradores, de la Universidad de Ontario Occidental y del Laboratorio Nacional de Los Alamos, calcularon el ritmo a que se producen los pequeños impactos. El resultado se ha extrapolado para determinar la frecuencia de incidentes mayores y más raros, como el de Tunguska. La frecuencia media de las colisiones de asteroides de la magnitud de la de hace cien años oscila entre una cada 200 años y una cada mil. Así pues, no sería de extrañar que hubiera un choque similar en nuestras vidas. Afortunadamente, el impacto de Tunguska tuvo lugar en un rincón deshabitado del planeta. Si algo parecido explotara sobre una metrópoli, quedaría arrasada. Saber qué pasó en Tunguska podría ayudarnos a prepararnos para una eventualidad semejante y tomar medidas para evitarla.

El primer paso consiste en establecer si el objeto que estalló en Siberia fue un asteroide o un cometa. Aunque las consecuencias se parecen en ambos casos, una diferencia importante es que los objetos del sistema solar que giran lejos del Sol, con órbitas de largo período (los cometas), golpearían la Tierra a velocidades muy superiores a las de cuerpos de órbitas más cercanas y período más corto (los asteroides). Al chocar contra la Tierra, un cometa podría liberar la misma energía cinética que un asteroide de mayor tamaño, y cuesta mucho más detectar un objeto muy lejano, de período largo, antes de que penetre en la parte interior del sistema solar. En cambio, la probabilidad de que tales cuerpos crucen la órbita terrestre es pequeña comparada con la de que lo haga un asteroide. No se ha confirmado ni un solo impacto cometario contra la Tierra.

Por lo tanto, si el evento de Tunguska lo causó un cometa, se trataría de un acontecimiento único, no un ejemplo importante de un tipo de fenómeno ya conocido. Pero si esa mañana de junio explotó un asteroide en el cielo de Siberia, ¿por qué no se ha hallado ningún fragmento?

La primera expedición

Sólo en 1927 llegaría una expedición a Tunguska. La dirigió Leonid Kulik, especialista en meteoritos de la Academia Rusa de las Ciencias. Se encontraron con un panorama increíble. De forma asombrosa, la explosión había derribado millones de árboles en una extensa franja con forma de mariposa, de más de 2000 kilómetros cuadrados, como Vizcaya. Más aún, los troncos cayeron conforme a una pauta radial que se extendía a lo largo de muchos kilómetros desde el área central, donde quedaban aún en pie "postes de telégrafos", to-

CONCEPTOS BASICOS

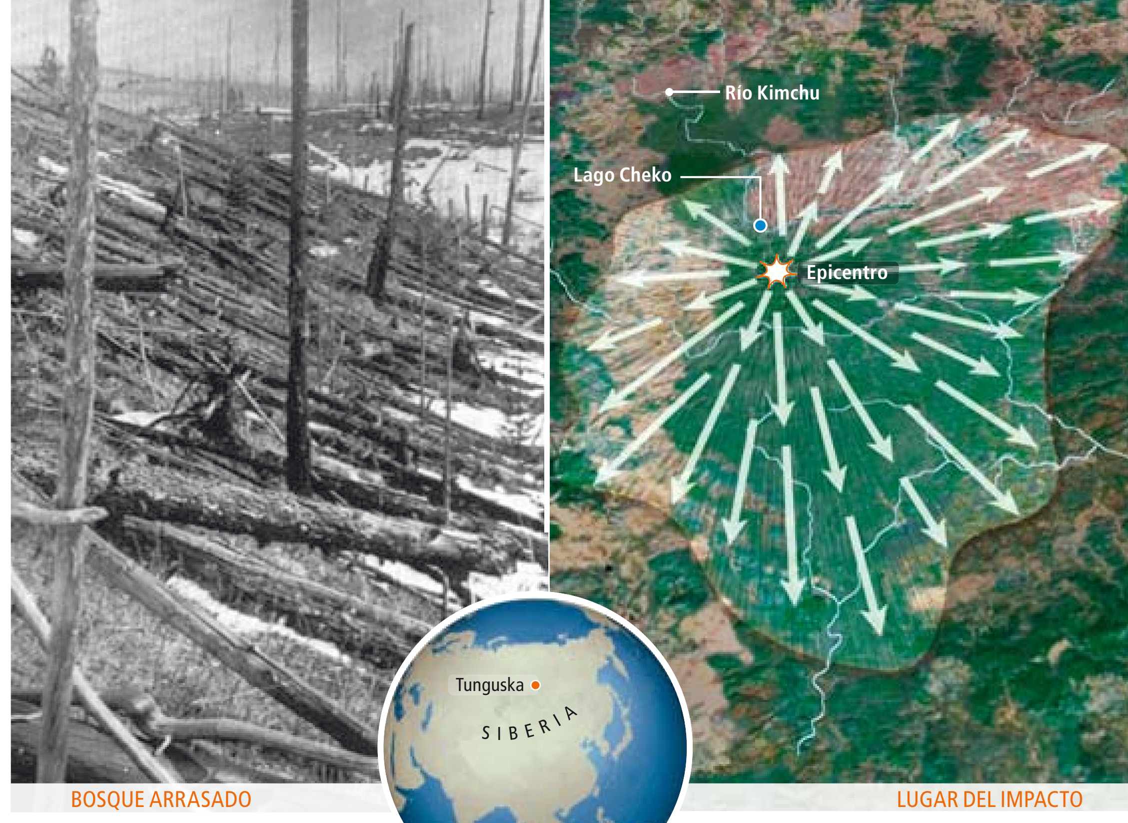
- Hace 100 años, un cometa o un asteroide explotó a pocos kilómetros de altura sobre la región de Tunguska, en la Siberia Central, y destruyó una vasta zona.
- A pesar de muchas expediciones, ninguna ha encontrado resto alguno del cuerpo que impactó. Encontrarlo podría ayudar a calibrar el peligro que suponen para la Tierra cometas y asteroides de tamaño medio.
- Un equipo de científicos italianos ha obtenido pruebas de que un lago puede en realidad ser un cráter excavado por un fragmento del cuerpo original, que cayó a unos 10 kilómetros de esa masa de agua. Pronto van a volver allá para recuperar un posible fragmento del objeto cósmico.

EL EVENTO DE TUNGUSKA

Muchos científicos creen que un asteroide o un cometa entró en 1908 en la atmósfera terrestre sobre Siberia Central (*mapa central*) y explotó a una altura de entre 5 y 10 kilómetros sobre el suelo. La explosión derribó 80 millones de árboles en una extensión de 2000 kilómetros cuadrados (*fotografías a la derecha y abajo; mapa de la zona cero en el extremo derecho de la página*). Si el objeto fue un asteroide, debió de tener un diámetro de entre 50 y 80 metros. Hasta ahora no se han hallado restos del objeto; al parecer, se desintegró.



ZONA CERO



BOSQUE ARRASADO

LUGAR DEL IMPACTO

cones de árboles en parte quemados. Kulik pensó que este paisaje arrasado era el resultado del impacto de un meteorito de hierro y emprendió la busca del cráter y de los fragmentos de meteorito.

Kulik dirigió otras tres expediciones a la región de Tunguska, a finales de ese decenio de los veinte. En la siguiente hubo muchas más, pero ninguna halló cráteres bien definidos, ni pedazos de algún cuerpo que hubiera golpeado la zona. La escasez de pruebas sobre el terreno dio lugar a diversas hipótesis. En 1946, Alexander Kazantsev, autor de relatos de fantasía científica, atribuyó la creación del extraño paisaje a la explosión en la atmósfera de una nave alienígena. En pocos años, la teoría de una explosión aérea fue ganando respaldo científico; se abandonaron otras conjeturas. La desintegración de un objeto cósmico en la atmósfera, a una altura de entre 5 y 10 kilómetros, explicaba la mayoría de las observaciones de campo realizadas. Los registros de los observatorios sísmicos, junto a las dimensiones de la devastación, permitieron estimar la energía y altitud de la explosión.

La ausencia de un cráter indicaba que el objeto quizá no fuese un sólido meteorito de hierro, sino un objeto más frágil: un asteroide rocoso —más raro que los de hierro— o un pequeño cometa. Los científicos rusos apostaban por esta última hipótesis porque un cometa, que se compone de partículas de polvo y hielo, no produciría ningún cráter. Según otra explicación, la devastación se produjo por la rápida combustión de gas metano liberado a la atmósfera desde el suelo pantanoso.

Modelos de laboratorio

En 1975 Ari Ben-Menahem, del Instituto Weizmann de Ciencia en Rehovot, analizó las ondas sísmicas desencadenadas por el evento de Tunguska y calculó que la energía liberada por la explosión fue de entre 10 y 15 megatones, como mil bombas atómicas de Hiroshima.

Desde entonces, los astrofísicos han generado simulaciones numéricas del suceso de Tunguska. La explosión en la atmósfera de un asteroide rocoso es la interpretación más aceptada. En 1993, los modelos de Christopher F. Chyba y sus colaboradores, preparados en el Centro Ames de Investigación de la NASA, propusieron que el asteroide tenía unas decenas de metros de diámetro y explotó a varios kilómetros sobre el suelo. La comparación de pruebas nucleares aéreas con el patrón de la tala del bosque de Tunguska parecía confirmar su tesis.

Según simulaciones más recientes, de N. A. Artemieva y V. V. Shuvalov, del Instituto para las Dinámicas de Geoesferas de Moscú, se trató de un asteroide de dimensiones parecidas que se vaporizó a una altura de

MARY EVANS *Photo Researchers, Inc. (zona cero)*; AP PHOTO *(bosque arrasado)*; KEVIN HAND *(mapas)*

entre 5 y 10 kilómetros. En su modelo, los finos residuos resultantes y un chorro de gas descendente se extendieron por la atmósfera. Las simulaciones no excluyen, sin embargo, la posibilidad de que fragmentos con un tamaño de alrededor de un metro sobreviviesen a la explosión y tocasen tierra no muy lejos de la vertical.

El año pasado, Mark Boslough y su grupo, de los Laboratorios Nacionales Sandia, llegaron a la conclusión de que el evento de Tunguska podría haber sido provocado por un objeto menor de lo calculado por las estimaciones anteriores. En su simulación por supercomputador, la masa del cuerpo celeste se convertía en un chorro en expansión de gas a altas temperaturas que se desplazaba a velocidades supersónicas. Asimismo, el modelo indicaba que el objeto sufrió primero una compresión causada por el incremento de resistencia de la atmósfera terrestre. A medida que penetraba en la atmósfera, la resistencia del aire debió de hacer que estallara y se convirtiese en una fuerte corriente de gas ardiente que, por el enorme impulso del objeto, se propagó hacia abajo. La bola de fuego transportaría energía adicional hasta la superficie; de ahí que pareciese que la explosión fue de entre 10 y 20 megatones, cuando, según Boslough, fue de entre 3 y 5. Todas estas simulaciones no hicieron más que fortalecer (y siguen haciéndolo) nuestro deseo de llevar a cabo trabajos de campo en Tunguska.

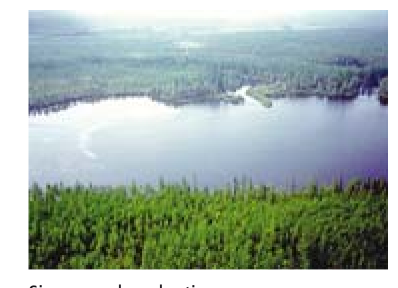
Viaje a Siberia

Nuestra implicación con el evento de Tunguska empezó en 1991, cuando uno de los autores (Longo) formó parte de la primera expedición italiana al lugar. Buscamos micropartículas de la explosión atrapadas en la resina de los árboles. Más tarde dimos con dos artículos casi desconocidos, de V. A. Koshelev y K. P. Florensky, que describían sus descubrimientos en una pequeña masa de agua, el lago Cheko, a unos ocho kilómetros del supuesto epicentro del fenómeno. En 1960, Koshelev conjeturaba que el lago Cheko podía ser un cráter producto del impacto. Florensky rechazaba tal idea. Creía que el lago era anterior al evento de Tunguska, basándose en su hallazgo de sedimento suelto de 7 metros de grosor en el fondo del lago.

La existencia de un lago tan cerca de la "zona cero" nos movió a efectuar allí trabajos de campo. Los sedimentos lacustres pueden albergar un archivo detallado de lo acontecido a su alrededor. Ese es el fundamento de la paleolimnología. Aunque nuestro equipo sabía poco del lago Cheko, pensamos que quizá podríamos aplicarle técnicas paleolimnológicas y hallar pistas en sus sedimentos que aclararan el misterio de Tunguska, como si el lago fuera la caja negra de un avión accidentado.

Pocos años después, nos encontramos viajando a Rusia en la bodega de carga de un Ilyushin II 20M, un viejo avión espía de hélice, del tiempo de la guerra fría. Tras conseguir los suficientes fondos y organizar nuestra aventura en cooperación con grupos de la Universidad estatal de Moscú y de la estatal de Tomsk (con la ayuda del ex cosmonauta Georgi M. Grechko), nos encaminamos hacia Tunguska. El avión acercó primero a la mayor parte de nuestro grupo e instrumen-

TUNGUSKA A VISTA DE PAJARO

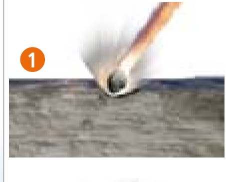


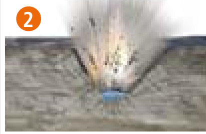
Si en su ordenador tiene acceso a Google Earth o a Microsoft Virtual Earth, observará el lago Cheko, creado quizá por el evento de Tunguska, en estas coordenadas geográficas: 60º 57′ 50,40″ Norte, 100º 51′ 36,01″ Este.
Puede encontrar la zona del impacto de Tunguska en 60º 54′ 59,98″ Norte, 101º 56′ 59,98″ Este.

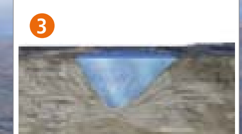
GIUSEPPE LONGO (*Lago Cheko*); KEVIN HAND (*ilustraciones del impacto*)

El evento de Tunguska y la creación del lago Cheko







Los autores conjeturan que escombros de la explosión aérea de Tunguska impactaron en la superficie y formaron el lago Cheko. La secuencia habría sido ésta:

1. Un fragmento de alrededor de un metro de tamaño sobrevivió a la explosión y chocó contra el suelo a unos 8 kilómetros de la zona cero, cerca del río Kimchu. La forma ligeramente elíptica del actual lago Cheko y su localización con respecto al epicentro de la explosión indican que la trayectoria del fragmento tuvo una inclinación de 45º y golpeó la superficie a velocidad inferior a 1 kilómetro por segundo.

2. La energía generada por el impacto del fragmento fundió el *permafrost*. La subsiguiente liberación de gas y agua aumentó el cráter hasta el tamaño actual del lago Cheko: unos 350 por 500 metros.

3. Los sedimentos depositados en los años posteriores por el río Kimchu han formado una fina capa sobre el fondo del lago.

SEGUIRLE EL RASTRO A UNA ESTRELLA DE LA MUERTE



Apophis es un asteroide de 300 metros de largo. Hay una probabilidad de uno en 45.000 de que choque con la Tierra en el 2036. Si, pese a todo, ocurriera, aniquilaría parte del planeta. La Sociedad Planetaria, organización sin ánimo de lucro que promociona la exploración espacial, quiere enviar una sonda que observe la trayectoria del Apophis. Con la información que se obtendría, se valoraría la amenaza y, si fuese necesario, se determinaría la mejor manera de desviar el asteroide. La Sociedad ofreció un premio de 25.000 dólares al mejor proyecto de seguimiento de Apophis. Ganó SpaceWorks Engineering, de Atlanta, con una sencilla nave espacial, apodada Foresight (Previsión), que costaría 140 millones de dólares. Giraría durante un mes alrededor del asteroide y luego lo seguiría de cerca en su órbita alrededor del Sol; transmitiría los datos a la Tierra.

KEVIN HAND

tal hasta una base militar próxima a Moscú. Luego volamos hasta Krasnojarsk, en la Siberia Central. Un enorme helicóptero Mi 26 (antes de uso militar) nos trasladó, junto con varios investigadores de la Universidad de Tomsk, hasta nuestro destino, en medio de la taiga infinita. Seis horas nos llevó este último tramo del viaje, con un insufrible ruido de los rotores.

Tras rodear las oscuras aguas del lago, el helicóptero descendió cerca de la ribera pantanosa, demasiado blanda para aterrizar. Saltamos a tierra bajo una lluvia torrencial. Ocho aspas giraban sobre nuestras cabezas. El remolino de aire y agua parecía que nos iba a arrastrar, pero encontramos el modo de descargar nuestro pesado equipaje. La nave se elevó y allí quedamos, al borde del lago, empapados y exhaustos, en el súbito y profundo silencio de la naturaleza siberiana. Había dejado de llover, pero el alivio que sentimos duró muy poco: nubarrones de mosquitos cayeron sobre nosotros.

Estudios *in situ*

Empleamos los dos días siguientes en organizar el campamento, montar el bote de medición (un catamarán) y probar los equipos. Nuestro trabajo requería de una amplia gama de instrumentos: sondas acústicas, un magnetómetro, analizadores acústicos del subsuelo, un georradar, dispositivos para la recogida de testigos de sondeo de sedimentos, una cámara de televisión subacuática y un equipo de receptores GPS que permitían a los grupos de estudio registrar su posición con una resolución de menos de un metro.

Durante el siguiente par de semanas, se tomaron mediciones del lago desde el catamarán, bajo un implacable asedio de hordas de mosquitos y tábanos. Exploramos los sedimentos y la estructura del subsuelo del lago. Con el georradar —radar que penetra en el subsuelo—, Michele Pipan, geofísico de la Universidad de Trieste, cartografió las estructuras subsuperficiales (entre 3 y 4 metros de profundidad) bajo los 500 metros de orilla. Eugene Kolesnikov, geoquímico de la Universidad de Moscú, y sus colegas excavaron zanjas en depósitos de turba cercanos al lago, un duro trabajo, por la resistencia de la tenaz capa de *permafrost*, el helado subsuelo. El equipo de Kolesnikov buscaba en la turba marcadores químicos del evento de Tunguska. Al mismo tiempo, Romano Serra, de la Universidad de Bolonia, y Valery Nesvetailo, de la de Tomsk, tomaban muestras de troncos para estudiar posibles anomalías en los anillos de crecimiento de los árboles. El avión que nos llevó hasta Krasnojarsk sobrevolaba la región tomando fotografías aéreas, que compararíamos con las que Kulik había realizado hacía unos 60 años.

Habíamos dado por supuesto que los sedimentos del fondo del lago podrían contener marcadores del episodio de Tunguska. Tras haber atravesado unas cuantas veces el lago Cheko con el analizador acústico de alta resolución, quedó claro que los sedimentos que cubrían el fondo del lago tenían más de 10 metros de espesor. Algunas partículas de los sedimentos habían sido transportadas hasta el lago por el viento, pero la mayoría las había aportado el río Kimchu, que alimenta el lago Cheko. Calculamos que la sedimentación en una pequeña masa de agua que se mantiene helada la mayor parte del año probablemente no excedería de unos pocos centímetros al año. La gruesa capa de sedimentos quizá significase que el lago existía ya antes de 1908.

Sin embargo, cuanto más perfilábamos el fondo del lago, más perplejos nos quedábamos. Parecía que el lago, de unos 50 metros de profundidad en el centro y acentuadas pendientes, tiene forma de embudo o cono invertido, algo difícil de explicar. Si el lago contara con miles de años de antigüedad, lo más probable es que tuviese un fondo plano, por el aporte de finos sedimentos No resultaba fácil dar razón de la forma de embudo apelando a los procesos clásicos de erosión y sedimentación que se desarrollan cuando los meandros de un río pequeño atraviesan un paisaje llano. Todos los miembros del equipo hablábamos de estas cuestiones por la noche, bajo lonas impermeables.

Nuestro tiempo en Tunguska se acababa. Empleamos el último día en desmontar el catamarán, empaquetar el material y desmantelar el campamento.

Indicios fascinantes

De regreso a nuestro laboratorio de Italia, los tres autores de este artículo terminamos de procesar los datos batimétricos. Confirmaban que la forma del fondo del lago Cheko difiere significativamente de la de otros lagos siberianos, de fondo plano y formados, en su mayoría, cuando el agua rellenó depresiones creadas al fundirse la ubicua capa de *permafrost*. Por el contrario, el lago Cheko se parece a cráteres de impacto de dimensiones similares; recordemos el cráter de Odessa, originado hace 25.000 años por el impacto de un pequeño asteroide en Odessa, Texas.

Nos iba convenciendo la idea de que el lago Cheko rellenaba un cráter de impacto. Sin embargo, si el lago fuera realmente un cráter provocado por un fragmento del cuerpo

Las mediciones del lago hallan anomalías



Una vez en el lugar del evento de Tunguska, los autores estudiaron el lago Cheko con sondas acústicas instaladas en un catamarán (*fotografía, derecha*). De acuerdo con los datos recogidos, el perfil del fondo del lago, bajo la capa de sedimentos, recordaba a un cráter de impacto (*imagen digital, arriba*). La sonda localizó también un objeto enterrado, denso, de alrededor de un metro de tamaño (*líneas de eco acústicas, centro*). Los autores volverán pronto para determinar si ese objeto es un fragmento del cuerpo que explotó en el aire en 1908.

GIUSEPPE LONGO (*barco con equipo*); FUENTE: "A POSSIBLE IMPACT CRATER FOR THE 1908 TUNGUSKA EVENT", POR L. GASPERINI ET AL., EN *TERRA NOVA*; AGOSTO DE 2007 (*líneas de eco acústicas*); KEVIN HAND (*malla metálica*)

cósmico de Tunguska, no podía haberse formado antes de 1908. Nos esforzamos en hallar pruebas de la existencia de la laguna antes de 1908. No resulta fácil encontrar mapas de esa parte deshabitada de Siberia anteriores al año en cuestión. El lago no aparece en un mapa militar de 1883. Según los testimonios de los habitantes de Evenk, el lago fue creado por la explosión de 1908. Ahora bien, si no existía antes de 1908, ¿cómo se explica el espesor de los depósitos que cubren el fondo lacustre? Nuestros datos de reflexión sísmica muestran dos zonas diferenciadas en los depósitos del lago: un delgado nivel superior, de casi un metro de espesor, formado por sedimentos finos y laminados, típicos de una sedimentación tranquila, superpuesto a un nivel inferior de depósitos caóticos, sin estratificar.

Un reciente estudio de dos paleobotánicas italianas, Carla Alberta Accorsi, de la Universidad de Módena, y Luisa Forlani, de la de Bolonia, ha puesto de manifiesto que el nivel superior de sedimentos contiene abundantes indicios de plantas acuáticas; en cambio, esas señales están del todo ausentes en los depósitos caóticos del nivel inferior, que sí contienen grandes cantidades de polen de los árboles del bosque. Da a entender que los auténticos depósitos miden sólo un metro de espesor, un grosor compatible con que el lago sólo tenga cien años. Parece que con anterioridad a la formación del lago hubo allí un bosque en terreno húmedo.

Un vídeo subacuático nos mostró también restos de troncos de árbol semienterrados en la zona más profunda del lago. Además, las ondas acústicas de alta frecuencia reflejadas en esa misma zona mostraban un característico patrón de puntas, que podría deberse a restos de troncos y ramas. Quizá se trate del bosque arrasado por el impacto.

Sospechosa forma del lago

Para explicar el nivel inferior, con sus depósitos caóticos, imaginemos el choque de un cuerpo celeste contra un terreno empapado y superpuesto a una capa de *permafrost* de decenas de metros de espesor. La energía cinética del objeto se transforma en calor, que funde el *permafrost*, libera metano y vapor de agua y aumenta el tamaño del cráter resultante en más de una cuarta parte. Al mismo tiempo, el impacto habría revestido los flancos del cráter con los depósitos de río y de pantano preexistentes, que así aparecerían en nuestros perfiles acústicos como depósitos caóticos.

Llama más la atención otro resultado. Un análisis exhaustivo de los perfiles sísmicos que obtuvimos por todo el lago descubrió, varios metros bajo el punto más profundo, una fuerte respuesta acústica, probablemente el eco de un objeto denso, rocoso, de un tamaño de alrededor de un metro. Este resultado se refuerza con una ligera anomalía magnética sobre el mismo punto, medida por el magnetómetro. ¿Apuntan todas estas señales a un fragmento del cuerpo cósmico de Tunguska?

Esperamos ansiosos encontrar la respuesta. Nuestro equipo está preparándose para volver pronto al lago. Intentaremos perforar su centro y alcanzar ese denso reflector sísmico. Este año de 2008 es el centenario del evento de Tunguska. ¿Será también el año en que se resuelva su misterio?

Bibliografía complementaria

THE 1908 TUNGUSKA EXPLOSION: ATMOSPHERIC DISRUPTION OF A STONY ASTEROID. C. F. Chyba, P. J. Thomas y J. Zahnle en *Nature*, vol. 3061, n.º 40, págs. 40-44; 7 de enero, 1993.

A POSSIBLE IMPACT CRATER FOR THE 1908 TUNGUSKA EVENT. Luca Gasperini, F. Alvisi, G. Biasini, Enrico Bonatti, Giuseppe Longo, M. Pipan, M. Ravaioli y R. Serra en *Terra Nova*, vol.19, n.º 4, págs. 245-251; agosto, 2007.

THE TUNGUSKA EVENT. Giuseppe Longo en *Comet/Asteroid Impacts and Human Society: An Interdisciplinary Approach*. Dirigido por Peter T. Bobrowsky y Hans Rickman. Springer Verlag, 2007.

LAKE CHEKO AND THE TUNGUSKA EVENT: IMPACT OR NON-IMPACT? Luca Gasperini, Enrico Bonatti y Giuseppe Longo en *Terra Nova*, vol. 20, n.º 2, págs. 169-172; 2008.

Agricultura sin labranza

La práctica ancestral de remover la tierra antes de sembrar una nueva cosecha constituye una de las principales causas de la degradación de las tierras de cultivo. La agricultura sostenible apuesta por el abandono del arado

David R. Huggins y John P. Reganold



1. JOHN AESCHLIMAN, adelantado de la agricultura sin labranza, comenzó a experimentar con esta técnica en 1974, preocupado como estaba por la erosión que avanzaba en la abrupta región de Palouse (estado de Washington), donde tiene su hacienda.



ANDY ANDERSON

John Aeschliman vuelca una palada de mantillo de tierra de su finca de 1600 hectáreas situada en la región de Palouse, al este del estado de Washington. Es una tierra negra; se desmenuza fácilmente, revelando una textura porosa y una abundancia de materia orgánica que facilita el crecimiento de raíces. Se ven también enjambres de lombrices, otra señal de buena salud.

Hace tan sólo treinta y cuatro años, en una palada de esa tierra se habrían visto, como mucho, sólo algunas lombrices. En aquel tiempo, Aeschliman araba el campo antes de cada siembra; con ello enterraba los residuos de la cosecha anterior y aprestaba el suelo para la siguiente. En la accidentada región de Palouse, hacía decenios que la tierra se cultivaba de ese modo. Pero el uso del arado le estaba cobrando un peaje: su suelo, famoso por lo fértil, se estaba erosionando a un ritmo alarmante. En 1974, convencido de la existencia de una mejor forma de trabajar la tierra, Aeschliman decidió experimentar con un nuevo método: el cultivo sin labranza.

En todo el mundo, la mayoría de los agricultores aran el campo para preparar la siembra. Al remover el suelo antes de sembrar se entierran los residuos de la cosecha anterior, el estiércol animal y las malas hierbas, a la vez que se airea y se caldea el suelo. Pero esa forma de limpiar y hurgar deja el suelo más expuesto a la erosión del viento y el agua. La labranza constituye una de las principales causas de la degradación del suelo agrícola (un grave problema ecológico a escala mundial). La labor supone una amenaza para la producción alimentaria y el sustento rural, sobre todo en las zonas pobres y densamente pobladas de los países en vías de desarrollo.

A finales de la década de los setenta del siglo pasado, en Palouse la erosión había eliminado el 100 por ciento del mantillo del diez por ciento de la tierra cultivable; en otro sesenta por ciento de aquella tierra, la pérdida del mantillo se situaba entre el 25 y el 75 por ciento. Además, la labranza favorece el vertido de sedimentos, abonos y plaguicidas a ríos, lagos y mares. El cultivo sin labranza, en cambio, minimiza la perturbación del suelo. Quienes lo practican, dejan en el campo los residuos de la cosecha tras la recolección, para que formen una capa de abono orgánico, que se suma al mantillo para proteger la tierra de la erosión y mejorar su productividad. Para sembrar, se emplea una máquina especial que traspasa los residuos y llega al suelo inalterado que hay debajo, donde las semillas germinan y afloran en la nueva cosecha.

En sus esfuerzos para alimentar a una población creciente, la agricultura ha experimentado una gran expansión, con su repercusión subsiguiente en el medio, la salud humana y la biodiversidad. Pero el planeta no es una fuente inagotable de recursos. No basta con que la producción de alimentos sea suficiente: debe ser, además, sostenible. Los agricultores deben producir cosechas de alta calidad, conservar los recursos naturales para las generaciones futuras, ganar dinero suficiente para su sustento, y desarrollar una política social justa con los empleados y la comunidad. El cultivo sin labranza contribuiría a esa agricultura más sostenible. Aunque el cambio entraña ciertas dificultades, cada día son más los labradores que abandonan el arado.

CONCEPTOS BASICOS

- El laboreo tradicional basado en el arado deja el suelo vulnerable a la erosión y favorece el arrastre de la tierra por el agua.
- Por ello, en algunos lugares del mundo los agricultores están recurriendo a una técnica sostenible, el cultivo sin labranza, que minimiza la perturbación de la capa edáfica.
- El elevado precio de la maquinaria especial y un arduo proceso de aprendizaje, entre otros factores, dificultan la adopción generalizada de las prácticas sin labranza.

Los autores

David R. Huggins, edafólogo del Servicio de Investigaciones Agrícolas del Departamento estadounidense de Agricultura, trabaja en la Agencia para la Gestión del Suelo y Conservación Hidrológica en Pullman. Se dedica a los sistemas de cultivos de conservación y su influencia sobre los flujos del carbono y nitrógeno edáficos. **John P. Reganold** ocupa la cátedra Regents de edafología en la Universidad de Washington en Pullman. Centra su trabajo en la agricultura sostenible.

HISTORIA AGRICOLA

Los orígenes del laboreo, con y sin labranza, son muy antiguos; merced a la evolución del arado, terminó por imponerse el primero. Sin embargo, durante los últimos decenios el desarrollo de herbicidas y maquinaria especializada ha hecho viable el cultivo sin labranza a escala comercial.

8000 a.C.

El primitivo palo de siembra permite depositar las semillas sin remover la tierra.

El arado de cincel
el más primitivo de los arados abre en el mantillo surcos en donde se depositan las semillas.



6000 a.C.

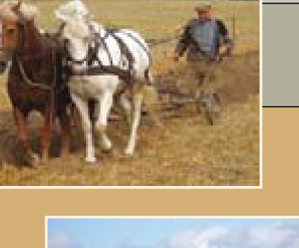
Los animales de tiro sustituyen al hombre para arrastrar el arado.

3500 a.C.

La reja, un apero en forma de cuña con el borde de acero, desmenuza la capa superior de tierra.

¿1100 a.C.?

El arado de vertedera
emplea una cuchilla curva (la vertedera) que voltea la tierra, con lo que entierra hierbas y residuos.

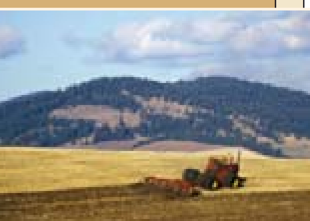


Mediados s. XIX

El arado de vertedera de acero
que inventa John Deere en 1837 permite hender el tepe de las praderas.

Principios s. XX

Los tractores
arrastran varios arados a la vez.

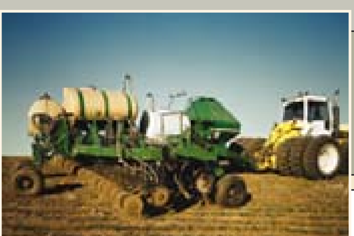


Décadas de 1940 y 1950

Herbicidas como el 2,4-D, la atrazina y el paraquat permiten tratar las malas hierbas con menos laboreo.

Década de 1960

Las sembradoras para el cultivo sin labranza
abren pequeños surcos para las semillas, minimizando la perturbación de la capa edáfica.



WU HONG EPA/*Corbis (arado de cincel)*; RALF ROLETSCHEK *(arado de vertedera)*; HUGH TALMAN *Smithsonian Images (arado de John Deere)*; LANE LAMBERT *iStockPhoto (tractor)*; ANDY ANDERSON *(sembradora especial)*

LAS DOS CARAS DE LA AGRICULTURA SIN LABRANZA

PROS

- Reduce la erosión del suelo
- Retiene el agua
- Mejora la salud del suelo
- Ahorra combustible y mano de obra
- Reduce la contaminación por sedimentos y abonos de lagos y ríos
- Secuestra dióxido de carbono

CONTRAS

- La transición del cultivo tradicional al cultivo sin labranza no resulta fácil
- El equipamiento necesario es caro
- Aumenta el uso de herbicidas
- Las malas hierbas, enfermedades y otras plagas pueden adquirir formas inesperadas
- Puede que al principio requiera mayor cantidad de abonos nitrogenados
- Lentifica la germinación y reduce la cosecha

Arar el futuro

Los pueblos han recurrido a métodos con y sin labranza desde que empezaron a cultivar la tierra, hace unos 10.000 años. En la transición desde la caza y la recolección hacia la agricultura, nuestros ancestros neolíticos cultivaban huertos junto a su casa y buscaban otros alimentos en el bosque. Algunos practicaban la versión más primitiva de la agricultura sin labranza: abrían con un palo orificios en la tierra, en los que dejaban caer las semillas y luego cubrían con tierra. Otros escarbaban el suelo con una estaca (una forma incipiente de labranza), para enterrar las semillas. Miles de labradores de los países en vías de desarrollo emplean todavía esos métodos de siembra.

Andando el tiempo, gracias a la aparición del arado, el laboreo mecánico del suelo se convirtió en el procedimiento normal de sembrar y controlar las malas hierbas, lo que permitió que el trabajo de unos pocos sostuviera a muchos. Uno de los primeros aperos fue el arado de cincel: un bastidor que sujetaba una estaca de madera vertical que se arrastraba por entre el mantillo. Posiblemente lo manejaban dos personas; una tiraba del apero y otra lo guiaba. Más tarde, la domesticación de los animales de tiro (como el buey en Mesopotamia, acaso ya en 6000 a.C.) desplazó a la potencia humana. El avance principal se produjo hacia 3500 a.C., cuando los egipcios y los sumerios inventaron la reja de arado: una máquina de madera en forma de cuña con una punta de hierro que aflojaba la capa superior del suelo. En el siglo XI, los europeos mejoraron aquella innovación añadiendo tras la reja una hoja curva, llamada vertedera, para voltear la tierra una vez desmenuzada.

Las mejoras continuas en el diseño del arado resultaron en el estallido de una agricultura de avanzada, mediado el siglo XIX. Los agricultores transformaron en campos de maíz, trigo y otros cultivos las praderas herbáceas de Europa Occidental, Sudáfrica, Canadá, Australia, Nueva Zelanda y Estados Unidos. Una de

esas regiones, la llanura central estadounidense, se había resistido al cultivo extensivo a causa de un tepe pegajoso y muy espeso, un fuerte obstáculo para los arados. Pero en 1837, un herrero de Illinois de nombre John Deere inventó un arado de vertedera de acero, que lograba romper aquel tepe. La antigua pradera, que abarca buena parte del "cinturón del maíz", es hoy asiento de una de las zonas de mayor productividad agrícola del mundo.

A principios del siglo xx prosiguió la mecanización de la agricultura. Se desarrollaron numerosos aperos que facilitaban una explotación más intensiva de la tierra; por ejemplo, unos tractores que tiraban de varios arados a la vez. Pero las prácticas de labranza estaban a punto de sufrir un replanteamiento profundo. La sequía que azotó EE.UU. entre 1931 y 1939 puso en evidencia la vulnerabilidad de una agricultura basada en el arado: el viento arrastró consigo preciosas capas de mantillo de las planicies sureñas de EE.UU. arrasadas por la sequía, dejando tras sí cosechas perdidas y fincas arruinadas.

Así nació el movimiento de conservación de suelos. Los agricultores empezaron a estudiar métodos de labranza reducida que preservaran los residuos de la cosecha a modo de capa protectora del terreno. Un movimiento espoleado con la publicación en 1943 de *Plowman's Folly*, del agrónomo Edward Faulkner, que ponía en tela de juicio la necesidad del arado. La propuesta radical de Faulkner ganó fuerza con el desarrollo de los herbicidas (2,4-D, atrazina y paraquat) tras la II Guerra Mundial. En la década de los sesenta se iniciaron las investigaciones sobre métodos modernos de agricultura sin labranza.

No ha resultado fácil alumbrar un modo de prescindir del arado. Dado el papel desempeñado por el arado en el laboreo de la tierra, su abandono requiere la reinvención de la producción agrícola en cada uno de sus aspectos. Con todo, desde la década de los sesenta, se han venido desarrollando sembradoras especiales para el cultivo sin labranza. Con los herbicidas, las nuevas máquinas constituyen las dos técnicas principales que han permitido practicar una agricultura sin labranza a escala comercial.

Compromiso

Los métodos que se utilizan ahora para preparar la siembra alteran la capa edáfica en medida diversa. El cultivo con arado de vertedera voltea por completo entre los primeros quince y 25 centímetros de tierra. El arado de cincel fractura sólo el mantillo y conserva mayor proporción de residuos superficiales. Los métodos sin labranza, en cambio, crean en cada hilera de siembra un surco de uno a ocho centímetros de ancho, en el que se dejan caer las semillas; la perturbación del suelo es mínima.

La agricultura sin labranza se engloba en la amplia definición que el Departamento de Agricultura estadounidense ha fijado para la agricultura de conservación. Esta comprende todo procedimiento que retenga residuos de la cosecha anterior en cantidad suficiente para que al menos el 30 por ciento del suelo quede cubierto tras la siembra. Los residuos desarrollan una importante función protectora. Según el Inventario Nacional de Recursos del Departamento de Agricultura de EE.UU., la erosión del agua y el viento en las tierras cultivables estadounidenses disminuyó en un 43 por ciento entre 1982 y 2003, debido en gran parte a la aplicación de la agricultura de conservación.

Pero la protección del suelo no es la única ventaja del laboreo sin arado. Los restos de cosecha que permanecen en el suelo facilitan la infiltración del agua y frenan la escorrentía. Una escorrentía menor reduce, a su vez, la contaminación de los recursos hidrológicos cercanos que se produce debido al arrastre de sedimentos, abonos y plaguicidas. Los residuos contribuyen también a la retención del agua mediante la reducción de la evaporación. En los casos en que la disponibilidad de agua limita la producción de la cosecha, una mayor conservación de agua reporta una cosecha más abundante y amplía las posibilidades de cultivos alternativos.

La ausencia de labranza favorece la biodiversidad: pone a disposición de los organismos edáficos, como las lombrices, el alimento procedente de los residuos y estabiliza su hábitat. Amén del consiguiente incremento de la materia orgánica edáfica, tales condiciones fomentan la formación de un suelo con una estructura más estable; ello aumenta la capacidad de sustentar cosechas y las protege de las tensiones mecánicas del laboreo y de riesgos ambientales. En consecuencia, la técnica sin labranza posibilita el cultivo más sostenible de terrenos en declives entre moderados y bruscos, que corren elevado riesgo de erosión y de otras agresiones.

La flora y la fauna locales salen también ganando con la ausencia de arado. Los residuos de las cosechas abandonados y las inevitables pérdidas durante la recolección del grano brindan abrigo y alimento a aves de caza y otras especies. En un estudio publicado en 1986, un grupo de investigadores de Iowa descubrieron doce especies que anidaban en campos sin labranza, comparadas con las tres asentadas en campos de labrantío.



DEAN CONGER *National Geographic/Getty Images*

OBSTACULOS PARA UN CAMBIO

La agricultura sin labranza es, en teoría, aplicable a la mayoría de las tierras cultivables del mundo. Pero el costo del equipo y los herbicidas resulta prohibitivo para la mayoría de los agricultores, sobre todo, los pequeños. Aparte de la inversión necesaria, la propia pobreza les impulsa a aprovechar los residuos de la cosecha y el estiércol a modo de combustible, entre otros usos, y a labrar la tierra en busca de ganancias a corto plazo, antes que a invertir en la explotación a largo plazo.

De los 525 millones de explotaciones agrícolas que hay en el mundo, un 85 por ciento no rebasan las dos hectáreas. La inmensa mayoría de esas explotaciones restringidas (en torno al 87 por ciento) se hallan en Asia (*arriba*). En Africa encontramos el 8 por ciento. La adopción del cultivo sin labranza en tales regiones, donde los beneficios potenciales son los máximos, es insignificante.

¿LABRAR O NO LABRAR?

Comparación de tres sistemas de cultivo para una rotación de cosechas de maíz y soja en el "cinturón del maíz" de Estados Unidos. El método sin labranza requiere el menor número de operaciones.

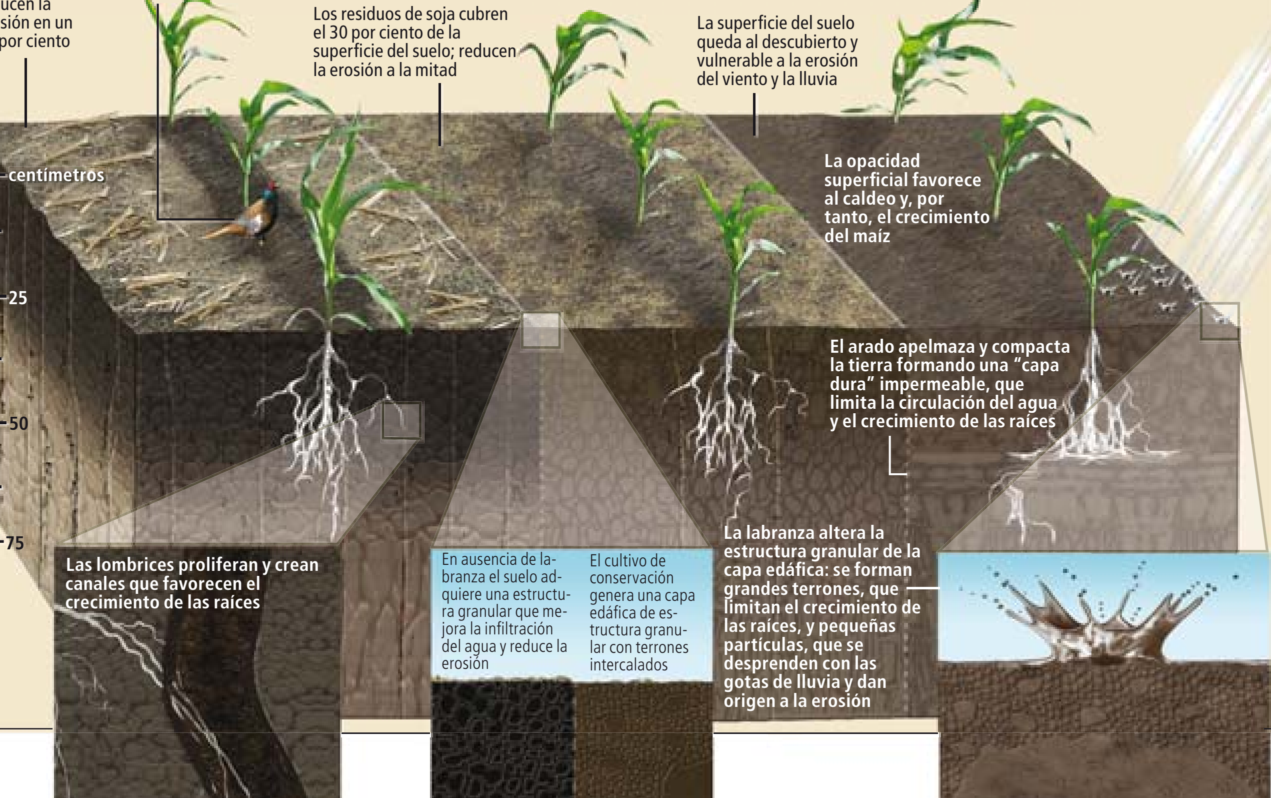
SIN LABRANZA
1. Aplicación de herbicida
2. Siembra
3. Aplicación de herbicida
4. Recolección

CULTIVO DE CONSERVACION
1. Labranza con arado de cincel, que entierra hasta un 50 por ciento de los residuos de recolección
2. Labranza con cultivadora de campo
3. Siembra
4. Aplicación de herbicida
5. Labranza con cultivadora de hileras
6. Recolección

CULTIVO TRADICIONAL
1. Labranza con arado de vertedera, que entierra el 90 por ciento de los residuos
2. Labranza con disco para alisar la superficie del suelo
3. Labranza con cultivadora para preparar el lecho de siembra
4. Labranza con rastra para allanar el lecho de siembra
5. Siembra
6. Aplicación de herbicida
7. Labranza con cultivadora de hileras
8. Recolección

Los residuos de soja y maíz cubren la superficie del suelo; retienen el agua y reducen la erosión en un 70 por ciento

Tras la recolección, los tallos de maíz erectos y los granos de maíz caídos brindan abrigo y alimento para la fauna [*el pájaro no está dibujado a escala*]



KEVIN HAND

Además, el suelo no labrado retiene mayor concentración de carbono que la tierra arada con vertedera. Una de las principales estrategias agrícolas para mitigar el gas de invernadero consiste en retener carbono en el suelo. Los cultivos toman dióxido de carbono de la atmósfera durante la fotosíntesis; los residuos sin recolectar y las raíces se transforman en materia orgánica edáfica, que contiene un 58 por ciento de carbono. Alrededor de la mitad de la capacidad potencial de las tierras de cultivo estadounidenses para retener carbono en el suelo procede de la agricultura de conservación, incluido el cultivo sin labranza.

La agricultura sin labranza ofrece ventajas económicas. El número de pasadas que se necesitan para fijar y recoger una cosecha desciende de nueve o más hasta cuatro o menos, si se prescinde del arado. Por tanto, se requiere entre un 50 y un 80 por ciento menos de combustible y entre un 30 y un 50 por ciento menos de mano de obra, lo que rebaja de forma notable los costes de producción por hectárea. Aunque la maquinaria especial para la siembra sin labranza es cara (algunas sembradoras rebasan los 65.000 euros), ya no es necesario emplear ni mantener otra maquinaria de cultivo. Al final, se recortan hasta en un 50 por ciento los costos de capital y explotación de las máquinas necesarias para fijar la cosecha. Con tales ahorros de tiempo y dinero, los agricultores pueden ser más competitivos a escalas menores o expandirse y cultivar mayor número de hectáreas: pueden duplicar la superficie cultivada con la misma maquinaria y la misma mano de obra. Además, el tiempo que

los agricultores dedicaban antaño a tareas de campo rutinarias, pueden emplearlo entonces en aspectos más interesantes del cultivo, la vida familiar o el esparcimiento, mejorando así su calidad de vida.

La hacienda en juego

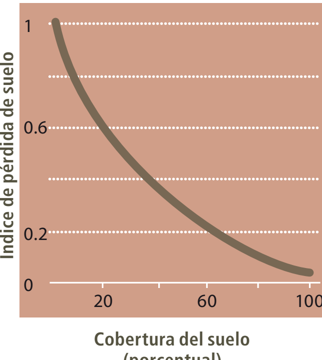
El cultivo sin arado y otras técnicas de agricultura de conservación pueden aplicarse en toda una variedad de climas, tierras y zonas geográficas. La agricultura sin arado continuo sirve para la mayoría de los cultivos, con la notoria excepción del arroz de humedal y los tubérculos (la patata). Sin embargo, en 2004 —último año con datos disponibles—, la agricultura sin arado se empleaba a escala mundial sólo en 95,5 millones de hectáreas, ni siquiera el 7 por ciento de los suelos cultivados del planeta.

Entre los cinco primeros países en agricultura sin labranza, EE.UU. figura el primero; le siguen Brasil, Argentina y Australia. Alrededor del 85 por ciento de esos terrenos sin labranza se encuentra en América septentrional y meridional. En 2004, se cultivó, mediante sistemas de conservación, del orden del 41 por ciento de toda la tierra laboreada en EE.UU.; en 1990, sólo un 26 por ciento. La mayor parte de ese incremento se debió a la expansión de los métodos sin labranza, cuyo uso se triplicó en ese período, hasta el extremo de que se aplicaron en el 22 por ciento de la tierra agrícola estadounidense. Las cifras reflejan el sentir de los agricultores, prestos a cumplir con la definición de cultivo de conservación para participar de los subsidios del gobierno y otros programas. En Sudamérica, la adopción de la agricultura sin labranza se ha llevado a cabo con cierta prontitud merced a la coordinación entre los técnicos agrónomos y las comunidades locales, que ha permitido desarrollar sistemas de cultivo sin labranza ajustados a sus necesidades.

En Europa, Africa y la mayor parte de Asia, el ritmo de adopción de la agricultura sin labranza ha procedido con lentitud. La aceptación de estas técnicas de cultivo ha resultado difícil sobre todo en los países africanos y asiáticos en vías desarrollo, donde los labradores suelen aprovechar los residuos de la cosecha a modo de combustible, alimento para animales y otros usos. Además, las sembradoras especiales para la deposición de semillas y los herbicidas o no han llegado a ese mercado o son prohibitivamente caros para los campesinos.

En Europa, la ausencia de políticas que promuevan el cultivo sin labranza, junto con fuertes restricciones al uso de plaguicidas (herbicidas incluidos) y otros factores, dejan a los

SALVAGUARDA DEL SUELO



2. SI SE DEJA UN 30 POR CIENTO del suelo cubierto con los residuos de la cosecha anterior, la erosión se reduce a la mitad, en comparación con un suelo desnudo en barbecho. Si el suelo se deja cubierto en un 50 por ciento durante todo el año, como ocurre en la agricultura sin labranza, la erosión se reduce de forma espectacular.

DANIELA NAOMI MOLNAR

agricultores con pocos incentivos para adoptar los procedimientos novedosos.

El cambio de la agricultura con arado a la agricultura sin arado no resulta tarea fácil. La dureza de la transición, unida a la percepción de que la ausencia de labranza supone un mayor riesgo de fracaso de la cosecha o de pérdida de rendimiento, ha puesto trabas a la adopción generalizada del método. Aunque los campesinos aceptan que la suya no es una profesión a salvo de riesgos, vacilan en adoptar unas prácticas nuevas, si el riesgo de fracaso resulta mayor que con las prácticas al uso.

Puesto que la agricultura sin labranza supone un cambio radical con respecto a las demás prácticas de cultivo, los agricultores que se pasan a aquélla deben superar una fase de aprendizaje ardua. Además de la exigencia de unas prácticas nuevas, la conversión repercute profundamente en las tierras y los campos: con el abandono del arado surgen nuevas especies de plagas, y varían los tipos de malas hierbas y de enfermedades de las cosechas. La humedad elevada asociada a la ausencia de labranza favorece el desarrollo de enfermedades fúngicas transmitidas por el suelo, que antes la labranza mantenía a raya. De hecho, el paso al cultivo sin arado ha ido muchas veces acompañado del descubrimiento de nuevas enfermedades de los cultivos.

Algunos de los cambios que derivan de la ausencia de labranza tardan años, incluso decenios, en desplegarse. Los agricultores deben mantenerse atentos y adaptables a un nuevo escenario, derivado de los cambios en las condiciones del suelo y en el uso de abonos. Durante la transición, hay un riesgo de reducción, si no pérdida, de la cosecha. En Palouse, por ejemplo, algunos agricultores que en la década de los ochenta intentaron pasarse al método sin labranza ya no están activos. Los que pretendan hacer el cambio, deben limitar inicialmente la superficie convertida del 10 al 15 por ciento de su superficie explotada total.

Los agricultores inexpertos en las técnicas sin labranza suelen visitar explotaciones en buena marcha; forman grupos locales o regionales de apoyo, donde comparten experiencias y discuten problemas. Sin embargo, el asesoramiento que reciban en regiones donde la adopción del cultivo sin labranza haya sido limitada puede ser incompleto o contradictorio; las lagunas de conocimientos, de experiencia y de técnicas pueden acarrear consecuencias desastrosas. Si una comunidad agrícola percibe que la técnica sin labranza entraña mayores riesgos que la tradicional, los bancos no concederán créditos a los agricultores que no usen el arado. Otra posibilidad es que los arrendatarios se encuentren con

que los propietarios se opongan al cultivo sin labranza por miedo a no cobrar lo estipulado. La mejora del intercambio de información entre agricultores, universidades, empresas agrícolas y organismos oficiales contribuirá a salvar tales obstáculos.

Con todo el sistema no deja de presentar inconvenientes, incluso operado por un agricultor avezado en las técnicas sin labranza. El cultivo sin arado en suelos de textura fina y mal avenados resulta especialmente problemático, a menudo con el resultado de una reducción del rendimiento. Las cosechas de maíz, por ejemplo, disminuyen entre un 5 y un 10 por ciento, sobre todo en las regiones norteñas. Y puesto que los residuos de la cosecha impiden que la radiación solar caldee la tierra, en primavera las temperaturas del suelo son más frías, con el retraso consiguiente de la germinación de las semillas y limitación del crecimiento temprano de los cultivos de estación cálida, como el maíz, en las latitudes septentrionales.

Además, en los primeros cuatro o seis años la agricultura sin labranza requiere el empleo

LA BUENA TIERRA

La lentitud con que el suelo se recupera hace de su conservación una tarea vital **por David R. Montgomery**

Uno de los principales inconvenientes del laboreo tradicional es que favorece la erosión del mantillo, sobre todo en los terrenos abruptos. La labranza deja la superficie del suelo desprotegida y vulnerable a las escorrentías; cada pasada del arado empuja tierra ladera abajo. Como resultado, con el tiempo la tierra pierde grosor. Lo que dure ese proceso depende no sólo del ritmo al que el arado empuje la tierra ladera abajo (y el viento y las escorrentías la arrastren consigo), sino también de la velocidad con que las rocas subyacentes se deshagan para formar tierra nueva.

En la década de los cincuenta del siglo pasado, cuando el Servicio estadounidense de Conservación del Suelo (actual Servicio de Conservación de los Recursos Naturales) empezó a definir los índices tolerables de erosión del suelo a partir de terrenos agrícolas, apenas se disponía de información sobre el ritmo de generación de suelo. La agencia determinó los valores tolerables de pérdida edáfica (valores T), basándose en lo que podrían hacer los agricultores para limitar la erosión sin unas "repercusiones económicas excesivas" y empleando maquinaria agrícola tradicional. Esos valores T corresponden a cifras del orden de dos centímetros y medio de erosión en 25 años. Sin embargo, investigaciones recientes muestran que el ritmo de erosión del suelo es mayor que el de recuperación.

Durante los últimos decenios, se ha descubierto que la velocidad de generación de suelo puede determinarse a partir de la concentración de ciertos isótopos, cuya velocidad de formación se conoce. A partir de la medición de esas concentraciones isotópicas en suelos de regiones templadas de la costa californiana y del sureste australiano, el geólogo Arjun Heimsath, de la Universidad estatal de Arizona, y sus colaboradores determinaron unas velocidades de generación de suelo comprendidas entre 0,030 y 0,080 milímetros anuales. La formación de un centímetro de suelo en esos lugares duraría, por tanto, de 125 a 330 años. Los estudios sobre generación de suelos, publicados en 2007 en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, revelan una velocidad media de 0,018 a 0,036 milímetros anuales, equivalentes a unos 280 a 570 años por centímetro de suelo vegetal formado.

El suelo de las laderas vírgenes en latitudes templadas y tropicales mide de treinta a noventa centímetros de espesor. Con unas velocidades de generación natural de suelo de entre 0,25 y 2,5 centímetros por siglo y unos ritmos de erosión de varios centímetros por siglo, la eliminación por laboreo con arado de la capa edáfica de esas zonas requeriría entre varios centenares y un par de miles de años. Tan sencilla estimación coincide con la duración de las principales civilizaciones agrarias. Con la excepción de los valles fluviales fértiles que vieron nacer la agricultura, las civilizaciones duraron de 800 a 2000 años. Los estudios geoarqueológicos muestran ahora la conexión entre la erosión del suelo vegetal y la decadencia de numerosas culturas antiguas.

Queda claro, pues, que la conservación de los recursos para las generaciones futuras reclama alternativas a las prácticas de laboreo tradicionales. Los sistemas sin arado son notoriamente eficaces para frenar la erosión: reducen la fuerza erosiva de las escorrentías y aumentan la capacidad del suelo para conservar la capa edáfica. En un estudio publicado en 1993, un grupo de investigadores de la Universidad de Kentucky descubrieron que el cultivo sin labranza reducía la erosión en más de un 98 por ciento respecto al cultivo tradicional. Más recientemente, expertos de la Universidad de Tennessee informaron de que los métodos sin arado aplicados al cultivo del tabaco reducían la erosión en un 90 por ciento. Aunque el efecto protector de la ausencia del arado depende de varios factores locales (tipo de suelo y cultivo), rebaja el ritmo de erosión hasta valores próximos a los de la velocidad de generación de suelo.



LA EROSION POR EL VIENTO en las planicies del sur de EE.UU. durante la gran sequía reveló los peligros del laboreo con arado.

GETTY IMAGES

A mediados de los años noventa del siglo pasado, investigadores de la Universidad de Cornell estimaron que la reparación de los daños causados por la erosión del suelo costaría a los EE.UU. 44.000 millones de dólares al año, y que haría falta una inversión anual de unos 6000 millones de dólares para igualar el ritmo de erosión de las tierras de labor a la velocidad de generación de suelo. Estimaron también que cada dólar invertido en la conservación del suelo ahorraría a la sociedad más de cinco dólares. Retornar la capa vegetal a un suelo que ya ha abandonado resulta prohibitivamente caro. La mejor estrategia, la más económica a largo plazo mantenerla en su sitio.

David R. Montgomery es profesor de geomorfología en la Universidad de Washington y autor de Dirt: The Erosion of Civilizations.

de mayor cantidad de abono nitrogenado para satisfacer las necesidades nutricionales de ciertas cosechas (hasta un 20 por ciento más que en los sistemas tradicionales), porque la mayor cantidad de materia orgánica que queda en la superficie inmoviliza los nutrientes, incluido el nitrógeno. En ausencia de labranza, debe aumentarse también la aplicación de herbicidas para mantener a raya las malas hierbas. En las explotaciones sin labranza empiezan a ser comunes las malas hierbas resistentes a los herbicidas. Por tanto, la continuidad de las prácticas sin labranza depende en buena medida del desarrollo de herbicidas de nueva formulación y de otras opciones de tratamiento de las malas hierbas. Costes aparte, un mayor uso de productos agroquímicos puede perjudicar a especies inocuas, amén de contaminar el aire, el agua y el suelo.



Integración de la nueva técnica

La agricultura sin labranza encierra el potencial de un sinnúmero de beneficios cada vez más necesarios en un mundo que se enfrenta al crecimiento demográfico, la degradación ecológica, el encarecimiento de la energía y el cambio climático, entre otros retos sobrecogedores. Pero la agricultura sin labranza no es ninguna panacea. Ni existe en agricultura. Antes bien, se integra en una nueva concepción de la agricultura sostenible, una visión más amplia y en evolución que apuesta por un abanico de métodos: desde el cultivo sin labranza hasta el orgánico, pasando por las combinaciones de los mismos. En nuestra opinión, todos los agricultores deberían acabar incorporando la agricultura de conservación, y la agricultura sin labranza si es posible, en sus campos.

El cultivo sin labranza del futuro deberá diversificar las estrategias de tratamiento de plagas y malas hierbas e incluir medidas biológicas, físicas y químicas para sortear la amenaza de la resistencia a los plaguicidas. A ese respecto, puede tomarse ejemplo de la agricultura biológica. Una de las técnicas indicadas, la rotación de cosechas —cultivo de una serie de cosechas distintas en el mismo terreno en estaciones sucesivas— ayuda al cultivo sin labranza en su guerra contra las plagas y las malas hierbas, pues rompe el ciclo de las enfermedades asociadas al cultivo de una sola especie.

La capacidad de cosechar cultivos económicamente viables favorecería la agricultura sin labranza y la haría más atractiva para los agricultores. Sin embargo, la actual presión sobre el cultivo de maíz para la producción de metanol en el "cinturón del maíz" de la llanura central de EE.UU. está fomentando el monocultivo, es decir, del cultivo, año tras año, de una sola cosecha, como el maíz, en un área muy extensa. Ese sesgo dificultará el cultivo sin labranza en esa región.

Los expertos siguen debatiendo si merece la pena dedicar las tierras de cultivo a la producción de combustibles. Pero si optamos por la senda de los biocombustibles, deberemos considerar la posibilidad de combinar la agricultura sin labranza con la rotación de cosechas para producirlos de modo sostenible. El desarrollo de cosechas alternativas para la producción de bioenergía en tierras marginales, incluidas plantas perennes como el césped (*Panicum virgatum*), complementaría y promovería el cultivo sin labranza, lo mismo que las cosechas perennes actualmente en desarrollo [*véase* "Vuelta a la agricultura perenne", por Jerry D. Glover, Cindy M. Cox y John P. Reganold; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2007].

Hoy, treinta años después de su primer intento de agricultura sin labranza en su hacienda de Palouse, John Aeschliman aplica el sistema al 100 por ciento de sus campos. Para adoptar la nueva técnica siguió un camino gradual y cauto que contribuyó a minimizar el riesgo de perder cosechas y beneficios. Hablamos, pues, de uno de los numerosos agricultores, grandes y pequeños, que están cosechando los beneficios del cultivo sin labranza y ayudando a que la agricultura evolucione hacia la sostenibilidad.

Bibliografía complementaria

CORN-SOYBEAN SEQUENCE AND TILLAGE EFFECTS ON SOIL CARBON DYNAMICS AND STORAGE. David R. Huggins, Raymond R. Allmaras, Charles E. Clapp, John A. Lamb y Gyles W. Randall en *Soil Science Society of America Journal*, vol. 71, n.º 1, págs. 145-154; enero/febrero 2007.

CONSTRAINTS TO ADOPTION NO-TILL FARMING IN DEVELOPING COUNTRIES. Rattan Lal en *Soil & Tillage Research*, vol. 94, n.º 1, págs. 1-3, mayo 2007.

DIRT: THE EROSION OF CIVILIZATIONS. David R. Montgomery. University of California Press, 2007.

NO-TILLAGE SEEDING IN CONSERVATION AGRICULTURE. Segunda edición, C. John Baker y otros. CABI Publishing, 2007.

KEVIN HAND

Espartales ibéricos

Los espartales, uno de los ecosistemas más representativos de las zonas más secas de la península Ibérica, constituyen un laboratorio natural de los ecosistemas semiáridos

Fernando T. Maestre

CONCEPTOS BASICOS

- En el espartal, las matas de esparto se distribuyen de suerte tal que optimizan la captación de aguas de escorrentía. Una consecuencia de esta distribución espacial es el enriquecimiento del suelo alrededor de las matas y su empobrecimiento en los claros que quedan entre las mismas.
- El esparto facilita la presencia de otras especies vegetales, pero cuando aumenta el estrés ambiental o cuando es muy débil, predomina la competencia interespecífica.
- Se suele considerar que el espartal procede de la degradación de pinares, encinares o matorrales. Sea o no así, la introducción de especies leñosas en el espartal parece adecuada para su gestión. Sin embargo, la mera plantación de pinos carrascos mediante aterrazamientos y subsolados no ha dado buenos resultados.

Las estepas dominadas por el esparto o atocha (*Stipa tenacissima*, de la familia de las *Poaceae*) constituyen uno de los ecosistemas más representativos de las zonas semiáridas de la cuenca mediterránea. Denominadas comúnmente espartales o atochales, estas formaciones vegetales se distribuyen de manera natural por el Mediterráneo Occidental y, más concretamente, por el noroeste de Africa —donde ocupan una extensión cercana a los 2,8 millones de hectáreas—, la península Ibérica y las islas Baleares. En España ocupan más de 400.000 hectáreas de terreno, principalmente en zonas del centro y sur de la Comunidad Valenciana, Murcia, el sur y este de Andalucía, la depresión del Ebro, La Mancha y Madrid.

Los espartales son formaciones abiertas, con valores de cobertura vegetal que oscilan entre el 19 y el 60 % del total de la superficie. Si bien están dominados por el propio esparto, que puede representar hasta el 95 % de cobertura, albergan numerosas especies perennes, tanto arbustivas como herbáceas, y sobre todo anuales, que pueden llegar a constituir hasta el 75 % de su composición florística (aunque su contribución a la biomasa total del ecosistema resulta casi despreciable).

Dentro de la península Ibérica, los espartales prosperan bajo una amplia diversidad de condiciones edáficas. Los encontramos en suelos desarrollados sobre margas, calizas o yesos. Habitan en zonas con rangos de precipitación entre los 100 y 600 mm anuales y bajo una extensa gama de temperaturas, aunque abundan en lugares con precipitaciones y temperaturas medias anuales comprendidas entre los 200-400 mm y los 13-19 ºC, respectivamente. Si bien la productividad del esparto se incrementa con el aumento de los nutrientes edáficos y la precipitación, como demuestran experimentos clásicos llevados a cabo por el desaparecido Servicio del Esparto en los años cincuenta, a partir de los 500 mm de precipitación no es capaz de competir con otras especies arbustivas y arbóreas mediterráneas. La distribución de los espartales queda así relegada a las zonas más áridas, de difícil colonización para otras especies.

Debido a su extensión, a sus peculiaridades botánicas, faunísticas y ecológicas y al importante patrimonio etnográfico y cultural que llevan asociado —se ha utilizado la fibra del esparto para los más variados usos desde tiempos inmemoriales—, los espartales constituyen uno de los ecosistemas más importantes de las zonas semiáridas ibéricas. No es de extrañar, pues, que en las dos últimas décadas hayan sido centro de atención de numerosos investigadores, interesados por multitud de aspectos relacionados con su ecología, geomorfología y evolución histórica. Estos estudios, cuyos principales resultados se resumen a continuación, no sólo han permitido conocer numerosos aspectos de su funcionamiento y dinámica, sino que también han posibilitado evaluar numerosos paradigmas e hipótesis dentro de áreas de conocimiento tan variadas como las interacciones planta-planta, la ecohidrología y la restauración ecológica.

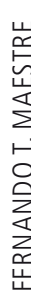
El esparto

El esparto es una gramínea perenne rizomatosa que suele alcanzar alturas próximas al metro. Su crecimiento es radial y lento —alrededor de un centímetro al año—, en forma de una sola mata durante las primeras etapas de desarrollo y con el paso del tiempo de anillo, que se origina al morir la parte central de la mata. Posee un sistema radicular superficial —raramente se encuentran raíces por debajo de los 50 cm de profundidad— formado por abundantes raíces finas que alcanzan picos de biomasa entre los 10 y los 20 cm de profundidad. Sus hojas, estrechas, filiformes y alargadas, pueden superar el metro de longitud; tienen una epidermis muy pelosa y los estomas están hundidos en surcos longitudinales. La longevidad media de estas hojas es de 2 años y, una vez secas, permanecen durante varios años en las matas antes de desprenderse.

El esparto presenta una serie de características morfoestructurales y fisiológicas que le han permitido colonizar con éxito los duros ambientes semiáridos mediterráneos. Entre las primeras se encuentran el mantenimiento de las hojas muertas en la mata y, sobre todo, la inclinación natural de las hojas. Así, buena parte de las hojas están sombreadas por hojas vecinas, lo que hace que se reduzca la parte fotosintética expuesta al sol durante las horas centrales del día hasta menos del 50 % de la superficie foliar total. Este autosombreo minimiza el riesgo de la destrucción del fotosistema II —una de las agrupaciones de clorofila de las plantas— por el sobrecalentamiento y el exceso de radiación, y contribuye a reducir las pérdidas de agua por evapotranspiración. No obstante, tiene como contrapartida una disminución en la fotosíntesis —que puede ser de hasta el 55 % del potencial de fijación de carbono—, tal como demuestran estudios realizados en Almería por Fernando Valladares, del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC de Madrid.

Entre los mecanismos fisiológicos de que dispone el esparto para soportar la aridez se encuentra la pérdida de clorofila de las hojas durante la sequía estival, lo que permite reducir de manera considerable la cantidad de luz absorbida por la planta, disminuyendo así el riesgo de daño por exceso de radiación del fotosistema II. Este fotosistema se mantiene activo incluso bajo condiciones severas de desecación de las hojas; de este modo, el esparto saca partido de los pulsos de recursos que, como las lluvias, ocurren ocasionalmente durante la época estival. Experimentos realizados en Almería por Francisco Pugnaire, de la Estación Experimental de Zonas Aridas, del CSIC, en Almería, y sus colaboradores han demostrado que el esparto responde rápidamente a un riego efectuado durante la época estival: aumenta significativamente su fotosíntesis y elongación foliar respecto a las plantas no irrigadas. En estudios a largo plazo, estos investigadores han observado un efecto

1. VISTA DE UN ESPARTAL SEMIARIDO típico, en los alrededores de Carabaña, Madrid. Puede apreciarse la estructura en mosaico de la vegetación y el predominio del esparto.





2. EJEMPLAR JUVENIL DE PINO CARRASCO (*Pinus halepensis*) que crece al abrigo de una mata de esparto. La mejora de las condiciones edáficas y microclimáticas en el entorno de las matas posibilita la existencia de interacciones facilitadoras entre el esparto y numerosas especies de plantas vasculares y no vasculares.

FERNANDO T. MAESTRE

similar; la elongación foliar, la fotosíntesis y el potencial hídrico del esparto dependieron del estado hídrico del suelo, que a su vez fluctuó estacionalmente con las precipitaciones.

La reproducción en el esparto ocurre de forma vegetativa y sexual. La reproducción vegetativa comienza con la fragmentación de los anillos que se originan conforme las matas aumentan de tamaño. Dicha fragmentación origina una serie de matas hijas que se hacen independientes y que, a su vez, formarán nuevos anillos de plantas hijas al aumentar de tamaño. Las flores del esparto, hermafroditas, se agrupan en inflorescencias de panícula fusiforme. La floración tiene lugar entre mayo y principios de julio, aunque bajo condiciones favorables puede adelantarse a marzo, como se ha comprobado en zonas semiáridas de Alicante.

El esparto es una especie autoincompatible que muestra vecería —años productivos e improductivos— en la generación de flores y semillas, que son dispersadas por el viento. Estudios realizados por María Gasque y Patricio García-Fayos en el Centro de Investigaciones sobre Desertización, en Albal, Valencia, del CSIC y la Universidad y la Generalidad de Valencia, han comprobado que las semillas pueden dispersarse a distancias superiores a los 30 m, aunque más de la mitad de las semillas dispersadas lo hacen a menos de 2,5 m del borde de la planta madre.

El reclutamiento de nuevas plántulas se desarrolla de forma continuada y va a depender de la producción de semillas, que a su vez está controlada por la densidad de matas de esparto, el tamaño de las mismas y las variaciones temporales en la producción de espigas. Tradicionalmente se ha considerado que la reproducción sexual del esparto se da únicamente bajo la sombra de los árboles. Esta afirmación no se sostiene a la luz de recientes ensayos realizados por los autores mencionados, quienes observaron una polinización menos eficiente, una menor densidad de individuos y una menor tasa de emergencia y supervivencia de las plántulas de esparto en pinares que en zonas abiertas de matorral.

Ecología de los espartales: del patrón al proceso

En las zonas semiáridas, la mayoría de las lluvias son de escasa entidad y difícilmente aprovechables por la vegetación. Por ello, las plantas vasculares deben desarrollar mecanismos no sólo para resistir la sequía y aprovechar los pulsos de recursos, sino también para captar y almacenar el agua aportada por las lluvias torrenciales, considerables aunque infrecuentes. Estos eventos generan flujos de escorrentía que, si se concentran en determinadas zonas, permiten a éstas disfrutar de unas condiciones hídricas más mésicas —un buen suministro de humedad— que lo que el régimen de lluvias sugiere, tal como apuntó Immanuel Noy-Meir a comienzos de los años setenta.

Este proceso tiene lugar en los espartales del sudeste ibérico, donde el trabajo realizado por Juan Puigdefábregas, de la Estación Experimental de Zonas Aridas, y colaboradores ha

demostrado la existencia —en zonas de cierta pendiente— de un patrón fuente-sumidero.

En esos espartales del sudeste, el agua y los sedimentos arrastrados por los flujos de escorrentía —generados tras los eventos lluviosos de cierta magnitud— se desplazan desde las zonas sin vegetación hacia las matas de esparto, que hacen de barrera para los flujos. Esta dinámica se ve favorecida también por las diferencias en infiltración entre las zonas sin vegetación y la cara norte de las matas de esparto. Es mucho mayor en esta última. Conviene mencionar que las matas de esparto no son los únicos sumideros en los espartales; los arbustos de cierto tamaño y otras estructuras situadas en contacto con la superficie del suelo —ramas muertas, piedras de gran tamaño y acumulaciones de hojarasca,— son muy efectivos reteniendo el agua, los sedimentos y los nutrientes arrastrados por los flujos de escorrentía.

La captación de agua va a condicionar la distribución de las matas de esparto en los espartales, que se organizan en el espacio para optimizar este proceso, tal como demuestran los estudios realizados por Puigdefábregas. Así, en zonas de moderada pendiente, donde la circulación de sedimentos no es muy intensa, las matas de esparto se alinean de forma paralela a las curvas de nivel. En zonas de mucha pendiente, estas matas no pueden retener los intensos flujos de agua y sedimentos que se generan, por lo que forman bandas paralelas a la dirección de máxima pendiente.

A largo plazo, la dinámica fuente-sumidero en los espartales provoca una disminución y empobrecimiento del suelo en las zonas desnudas y un enriquecimiento del mismo en el entorno de las matas. Asimismo, la elevada concentración de biomasa y hojarasca en la mata de esparto, unida a la captación de agua y sedimentos procedentes de los flujos de escorrentía y a la mejora del microclima en sus inmediaciones (la sombra de las matas amortigua la dureza del clima sobre las plantas al reducir la evaporación edáfica y el exceso de radiación) propicia la creación de un microambiente en el entorno de las matas nítidamente diferenciado del de los claros circundantes.

El suelo existente bajo las matas de esparto se caracteriza por presentar una menor compactación, una mayor proporción de arenas, mayores contenidos de humedad después de una lluvia y de materia orgánica, un mayor número de propágulos —estructuras que se separaran de la planta y la reproducen asexualmente— micorrícicos —las micorrizas son la simbiosis de raíces y hongos— y mayores valores del cociente entre el carbono y el nitrógeno del suelo que en los claros contiguos.

Las modificaciones edáficas generadas por el esparto forjan auténticas "islas de recursos" en las inmediaciones de las matas que, junto a la mejora del microclima en estos lugares, repercutirán en la distribución espacial, al establecimiento y a la supervivencia de numerosas especies animales y vegetales. En las zonas semiáridas del sudeste ibérico, el microambiente proporcionado por las matas de esparto es aprovechado por numerosas especies de briófitos —musgos— y líquenes, algunos de los cuales, como *Lepraria crassisima* var. *isidiata*, *Parmelia pokornyi*, *Cladonia pyxidata* var. *pocillum* y *Psora albilabra*, no pueden sobrevivir en las condiciones secas y soleadas de los claros situados entre las matas.

La investigación realizada en Almería y Alicante ha observado que las comunidades de plantas anuales poseen mayores valores de diversidad, cobertura y biomasa en el entorno de las matas que en los claros adyacentes, y que existe una asociación positiva entre las matas de esparto y la distribución espacial de especies arbóreas y arbustivas (*Pinus halepensis, Anthyllis cytisoides*, *Ephedra fragilis*, *Globularia alypum* y *Thymus vulgaris*, entre otras).

Estas observaciones han sido completadas con experimentos acometidos por el autor, Jordi Cortina y Susana Bautista, de la Universidad de Alicante, en espartales alicantinos, en los que se ha visto que la supervivencia de especies arbustivas como el lentisco (*Pistacia lentiscus*) y la coscoja (*Quercus coccifera*) era mayor cuando se los plantaba en la cara norte de las matas



3. RESTOS DE VEGETACION ARBUSTIVA en un espartal semiárido. Los arbustos desempeñan un papel clave en el funcionamiento de los espartales semiáridos degradados, ya que aumentan la productividad, el contenido de nutrientes y la capacidad de recuperación del ecosistema frente a las perturbaciones. Proporcionan un hábitat adecuado para numerosas especies animales y vegetales.

FERNANDO T. MAESTRE

de esparto que cuando se los introducía en los claros situados entre las matas. En la misma línea, Patricio García-Fayos y María Gasque han observado que la mortalidad estival de arbustos establecidos naturalmente en espartales de Alicante y Valencia era notablemente mayor en los claros que en las inmediaciones de las matas de esparto. Así pues, las modificaciones edáficas y microclimáticas generadas por el esparto influyen de manera decisiva en la estructura y composición de los espartales.

Facilitación y competencia

En su conjunto, las distintas observaciones y experimentos realizados en los espartales sugieren que el esparto es capaz de facilitar el establecimiento y desarrollo de numerosas especies de plantas vasculares y no vasculares. Unos resultados que concuerdan con numerosas observaciones de campo recogidas en otros ecosistemas sobre la importancia y generalidad de las interacciones positivas o "facilitación".

Distintos estudios han puesto de manifiesto que las interacciones facilitadoras y las competitivas entre las especies vegetales actúan simultáneamente en las comunidades naturales; el resultado neto de una interacción determinada es la suma de efectos positivos y negativos de distinta magnitud. En este sentido, Mark Bertness y Ragan Callaway propusieron en 1994 un modelo que establece que la importancia de la facilitación frente a la competencia aumenta al par que las condiciones de estrés.

Con el fin de evaluar si este modelo es válido en los espartales, el autor y Jordi Cortina realizaron un experimento con el que estudiaron el efecto del esparto en la supervivencia de plántulas de lentisco a lo largo de un gradiente de estrés ambiental. Contrariamente a lo establecido por el modelo de Bertness y Callaway, se encontró una menor supervivencia en las inmediaciones de las matas de esparto en los dos extremos del gradiente de estrés evaluado. Es decir, en condiciones de estrés muy intenso puede darse competencia, al igual que en condiciones de poco estrés. En este sentido, no hay que olvidar que el propio esparto compite también por el agua con las especies que tiene a su alrededor, y que bajo condiciones de elevado estrés, como las que se producen durante los años con escasez de lluvias primaverales seguida de una prolongada sequía estival, las mejoras edáficas y microclimáticas propiciadas por el esparto pueden no compensar su propia toma de agua, con lo que ejerce un efecto neto negativo sobre dichas especies.

Funcionalidad y costra biológica

La formación de "islas de recursos" y las interacciones entre el esparto y otros organismos son procesos que operan a escala fina, de mata individual, y que, en buena medida, van a verse afectados por propiedades de las matas de esparto, como su número y tamaño. Estas características de las matas desempeñan un papel clave en el funcionamiento del ecosistema a escalas mayores. Así, recientes estudios llevados a cabo por el autor y Jordi Cortina en espartales semiáridos del sudeste ibérico sugieren que la funcionalidad de los espartales —evaluada a partir de su capacidad para reciclar nutrientes, infiltrar el agua de escorrentía y resistir la pérdida de suelo por erosión— está positiva y significativamente relacionada con el número, tamaño y distancia media entre





FERNANDO T. MAESTRE

4. COSTRA BIOLOGICA característica de las inmediaciones de las matas de esparto (*izquierda*) y de los espacios sin vegetación situados entre las mismas (*derecha*) sobre sustrato margoso. En el primer caso, la costra está dominada por los musgos, mientras que en el segundo los líquenes (*manchas amarillas, marrones y rosáceas*) y las cianobacterias (*matriz negruzca*) son los componentes mayoritarios. Estas diferencias en la composición de las costras biológicas entre las zonas desnudas y la parte norte de las matas de esparto propician un aumento de la escorrentía y de la infiltración en estos microambientes, respectivamente.

matas de esparto consecutivas, así como con la cobertura de los arbustos rebrotadores.

Conviene destacar el importante papel que estos arbustos desempeñan en los espartales, ya que no sólo son importantes determinantes de la función del ecosistema, sino que repercuten también en la riqueza específica y diversidad de plantas vasculares perennes, pese a que su cobertura no suele ser muy elevada.

La investigación nos muestra, además, que las funciones del ecosistema no se recuperan al mismo ritmo tras una perturbación en los espartales. Así, el tiempo necesario para restablecer las funciones relacionadas con el reciclado de nutrientes de modo que el ecosistema vuelva a ser capaz de autorregularse es considerablemente superior al requerido para alcanzar dichos niveles tras procesos erosivos. El proceso va íntimamente ligado a la recolonización y expansión de los arbustos en los espartales. De tales resultados se desprende que los espartales semiáridos, con los niveles de degradación que presentan en la actualidad, representan un estado de inmadurez funcional respecto a las comunidades dominadas por las especies arbustivas rebrotadoras.

En párrafos anteriores se ha puesto de manifiesto la importancia que la dinámica fuente-sumidero adquiere en el funcionamiento de los espartales, lo que no significa que las zonas situadas entre las matas sean meros lugares de exportación de agua, sedimentos y nutrientes hacia las matas de esparto. En estos ambientes se desarrolla un particular conjunto de organismos —bacterias, cianobacterias, algas, musgos y líquenes— que recibe el nombre de costra biológica. Esta costra, presente en las zonas áridas y semiáridas de todo el globo, interviene de forma destacada en el funcionamiento del ecosistema, pues supone una importante fuente de carbono y nitrógeno, incrementa la estabilidad del suelo, afecta a los flujos de agua e influye en el establecimiento, contenido nutricional y estado hídrico de las plantas vasculares.

La investigación realizada en el desierto del Negev (Israel) por David Eldridge y sus colaboradores, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, ha puesto de manifiesto que la costra biológica dominada por líquenes y cianobacterias propicia la generación de estos flujos hacia las manchas de vegetación. En el caso de los espartales, se ha comprobado que las diferencias en la composición de las costras biológicas entre las zonas desnudas y la parte norte de las matas de esparto propician un aumento de la escorrentía y de la infiltración en tales microambientes, respectivamente. Si bien estos estudios dan a entender que los componentes de la costra biológica contribuyen a la generación de la dinámica fuente-sumidero en los espartales, se desconoce el peso de la costra biológica —en comparación con otras características físicas de la superficie del suelo— en la generación de flujos de agua aprovechables por la vegetación, así como su contribución a los flujos de nutrientes y a la dinámica de la vegetación en los espartales. De esas cuestiones nos ocupamos ahora en espartales de Alicante.



FERNANDO T. MAESTRE

5. VISTA DE UN ESPARTAL de repoblación en las inmediaciones de Fortuna (Murcia). Los trabajos de plantación en los espartales sometidos a explotación se realizaban durante el otoño. Consistían en plantar porciones de rizoma con unas cuantas hojas procedentes de un esparto ya existente y se las dejaba crecer sin que recibieran ningún tipo de tratamiento posterior.

Uso de los espartales

El análisis de la ecología de los espartales no debe dejar de lado el hecho de que estos ecosistemas han estado íntimamente ligados a las actividades de los pobladores de las zonas que habita, que han utilizado desde la prehistoria la fibra de esparto para la fabricación de pasta de papel, cuerdas y los más variados utensilios, entre otros, zapatos, cestas, redes de pesca, costales, espuertas y capachos para el prensado de la uva y la aceituna. Así, en Granada (Cueva de los Murciélagos, en Albuñol) se han encontrado restos de útiles fabricados con fibra de esparto que datan del año 3500 a.C., aunque seguramente el esparto se ha aprovechado en la península Ibérica desde mucho antes. En tiempos de los iberos era bastante corriente emplear fibra del esparto para fabricar numerosos utensilios. Se asegura incluso que en aquella época existía toda una cultura ibérica del esparto. La fibra de esta especie fue muy utilizada por las tropas romanas durante las guerras púnicas, en el siglo III a.C. Varios autores griegos y romanos

El autor

Fernando T. Maestre es investigador contratado Ramón y Cajal del departamento de biología y geología de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid. Fue becario posdoctoral MECD/Fulbright en el Departamento de Biología de la Universidad Duke, en Carolina del Norte. Realizó su tesis doctoral en la Universidad de Alicante, donde estudió, entre otros aspectos, los efectos de la heterogeneidad espacial de la vegetación y las propiedades edáficas en el funcionamiento y restauración de los espartales semiáridos.

mencionan las vastas extensiones del sudeste peninsular ocupadas por los espartales, a la que llamaron "Spartarion Pedion" y "Campus Spartarius".

Con distintos altibajos, en función de la situación socioeconómica y política del país, la recolección de la fibra de esparto y el manejo de los espartales en España se mantuvo hasta la segunda mitad del siglo XX. Los flujos migratorios hacia las ciudades que comenzaron en los años sesenta, la irrupción de las fibras sintéticas y la pérdida de parte de sus antiguas prestaciones provocaron que la superficie de los espartales y su producción disminuyera de manera drástica en un breve período de tiempo. Así, según datos del Ministerio de Medio Ambiente, los espartales ocupan en la actualidad en España unas 409.000 hectáreas —en 1968 había 684.000 ha—, mientras que la recolección de fibra de esparto ha caído de 40.757 toneladas en 1969 a 89 en 1994.

Debido a sus usos, el hombre ha favorecido la expansión del esparto, cultivándolo en ocasiones —mediante la plantación de porciones de las matas durante el otoño—, estimulando su crecimiento —por medio del entresacado de las matas y la limpia de las hojas muertas— y eliminando aquellas especies que competían con el esparto por el agua y los nutrientes (con quemas repetidas, que se realizaban cada 4 o 5 años, y el pastoreo). Si bien es evidente que la acción del hombre ha moldeado el funcionamiento y dinámica de los espartales durante siglos, el efecto de esta actividad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas en la actualidad, así como en su dinámica futura, constituye una incógnita.

En un reciente estudio, el autor ha evaluado el efecto de la actividad humana en los espartales durante los últimos siglos —estimada indirectamente a partir de datos históricos de población y de accesibilidad— en el número y diversidad de especies de plantas perennes en espartales de Alicante y Murcia. Los resultados del trabajo muestran la existencia de una relación significativa y negativa entre las cifras de población durante los últimos 300 años (entre 1787 y 1950) y estas variables. La incidencia de la actividad, sin embargo, fue menor que la de las características estructurales del ecosistema —como la cobertura de arbustos rebrotadores y las características espaciales de las matas de esparto— y que la de los factores abióticos (la altitud, por ejemplo).

En la misma línea, la investigación acometida en Almería por Inmaculada Alados y sus colaboradores, del Instituto Pirenaico de Ecología del CSIC, indica que los usos tradicionales del ecosistema, como el pastoreo, han favorecido la degradación de los matorrales y su conversión en espartales. Estos autores han encontrado una relación negativa entre la probabilidad de que un espartal evolucione hacia un matorral y la densidad de casas en el área, así como una relación positiva entre dicha probabilidad y la distancia del espartal al núcleo de población más cercano.

Los resultados de los estudios reseñados sugieren que la actividad humana desarrollada en el pasado repercute en la estructura y composición de los espartales en la actualidad, así como en su dinámica. El análisis pormenorizado de los efectos de la actividad humana sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas encuentra múltiples dificultades metodológicas; escasean los registros e indicios que permitan estimar el impacto de las actividad humana, del pastoreo y la recolección de fibra de esparto en zonas concretas. Su estudio, con todo, reviste interés principal para comprender el funcionamiento y dinámica de los espartales.

6. REPOBLACION DE PINO CARRASCO (*Pinus halepensis*) realizada mediante subsolado y aterrazamiento en una zona de espartal semiárido, de las proximidades de El Campello. Obsérvese el impacto visual de los aterrazamientos y el escaso desarrollo del arbolado introducido.



FERNANDO T. MAESTRE

Restauración mediante plantaciones

Numerosos autores han estudiado el papel de los espartales dentro de la sucesión vegetal. Se trata de un aspecto controvertido. En las zonas semiáridas del norte de Africa, según Henri Noël Le Houérou, del Centro de Ecología Funcional y Evolutiva de Montpellier, estas formaciones aparecen tras la degradación de bosques abiertos dominados por el pino carrasco (*Pinus halepensis*), el araar (*Tetraclinis articulata*), la sabina (*Juniperus phoenicea*) y

la acacia (*Acacia tortilis* spp. *radiana*). Josias Braun-Blanquet, padre de la fitosociología y maestro de botánicos españoles, sostenía, sin embargo, que era la formación climácica —el clímax de la sucesión geobotánica— en las zonas que bordean el desierto.

La mayoría de los botánicos y fitosociólogos piensan que los espartales son en la península Ibérica etapas de degradación de encinares de *Quercus ilex*, pinares de pino carrasco o matorrales esclerófilos mediterráneos dominados por la coscoja, el lentisco y el espino negro (*Rhamnus lycioides*). No obstante, éste es un aspecto en plena discusión y hay investigadores que consideran a los espartales semiáridos ibéricos formaciones climácicas o, cuando menos, altamente estables en el tiempo.

Atendiendo a los modelos de dinámica sucesional propuestos por Salvador Rivas Martínez, de la Universidad Complutense, en ausencia de perturbaciones sería esperable observar en los espartales, en las zonas donde las precipitaciones lo permitan, un aumento progresivo de la cobertura de arbustos y árboles. No obstante, dicho aumento raramente se aprecia en la actualidad en zonas semiáridas, ni siquiera en espartales donde toda actividad humana cesó hace varias décadas.

Independientemente de que se considere o no a los espartales comunidades seriales —una fase intermedia en una sucesión de sistemas ecológicos—, la introducción de especies leñosas autóctonas en ellos encierra interés desde el punto de vista de la gestión. Favorecería su heterogeneidad y diversidad, aumentaría su "resiliencia" —capacidad de recuperación tras una perturbación—, mejoraría su capacidad de retener y utilizar recursos y contribuiría al desarrollo de las comunidades animales asociadas a las especies arbustivas. Asimismo, no hay que olvidar que los espartales, debido a las características climáticas, geomorfológicas, litológicas y edáficas de las zonas donde se desarrollan, son altamente sensibles a los procesos de erosión del suelo y desertización y que muchos de ellos se encuentran muy degradados. En estos casos, la introducción de especies leñosas contribuiría a frenar las pérdidas de suelo por erosión y a revertir los procesos de degradación a medio y largo plazo.

La plantación de especies leñosas en los espartales se ha venido realizando desde hace decenios en España. Dentro de las políticas de restauración hidrológico-forestal y, más recientemente, de los planes puestos en marcha por distintas administraciones para luchar contra la desertización, numerosos espartales del sudeste ibérico han sido objeto de repoblaciones forestales. En la mayoría de las veces, estas actuaciones se proponían mejorar la situación actual de degradación de la cubierta vegetal, restablecer las funciones de protección del suelo y regulación hídrica de la vegetación y acelerar el proceso de sucesión vegetal. En la práctica, han consistido casi exclusivamente en plantaciones de pino carrasco realizadas siguiendo un marco regular y con una preparación previa del terreno mediante aterrazamientos o subsolados.



FERNANDO T. MAESTRE

7. CARCAVAS EN UN ESPARTAL SEMIARIDO sobre terreno margoso en las inmediaciones de Petrel (Alicante). Buena parte de los espartales semiáridos ibéricos presentan cierto grado de degradación de la cubierta vegetal. En casos de degradación severos, como en la fotografía, se generan cárcavas que propician la pérdida de recursos (agua, sedimentos y nutrientes) del ecosistema y su posterior degradación.

Pero tales plantaciones han generado en numerosas ocasiones masas arbóreas de escaso porte, que no han promovido una recuperación significativa de la cubierta vegetal, que sufren una alta recurrencia de plagas, como la procesionaria del pino (*Taumetopea phytocampa*), y con un gran impacto visual. Asimismo, han originado numerosos problemas de erosión asociados al empleo de terrazas y otras técnicas agresivas de plantación, que no han respetado la estructura de la vegetación ni los flujos de agua y sedimentos en la ladera.

Si bien estas plantaciones han seguido criterios ecológicos en cuanto a sus objetivos, en numerosas ocasiones han conseguido un efecto contrario al perseguido, pues han acentuado las pérdidas de suelo por erosión y los procesos de degradación. Sus impactos ecológicos y visuales han generado una notable polémica entre gestores, científicos de distintas áreas y organizaciones no gubernamentales con fines conservacionistas, sobre la idoneidad de estas actuaciones en zonas semiáridas. Tal situación pone de manifiesto la necesidad de nuevas técnicas de gestión y restauración ecológica, adecuadas a las características de los espartales.





8. VISTA DE DOS ESPARTALES SEMIARIDOS que difieren en su estado de degradación; el situado a la izquierda (inmediaciones de Alicante) se encuentra más degradado que el de la derecha (Aigües de Busot, Alicante). Espartales con distintos niveles de degradación requieren estrategias de gestión y restauración diferentes. En la zona de la izquierda es necesario frenar las pérdidas de suelo por erosión y recuperar funcionalidad y estructura; para ello, pueden introducirse sumideros mediante el apilamiento de ramas muertas. En la zona de la derecha las medidas de gestión pasarían por la plantación de especies arbustivas rebrotadoras. Dicha plantación incrementaría la diversidad del ecosistema y su capacidad de recuperación ante las perturbaciones; además, facilitaría la llegada de nuevas especies animales y vegetales a medio y largo plazo.

FERNANDO T. MAESTRE (*izquierda*); JORDI CORTINA (*derecha*)

Gestión basada en la heterogeneidad

Hemos visto que los espartales son ecosistemas caracterizados por un elevado grado de heterogeneidad en la distribución espacial de la vegetación y las propiedades edáficas, heterogeneidad que cumple una función clave en su funcionamiento y dinámica. Parece, por ende, razonable pensar que el establecimiento de medidas de gestión y restauración ecológica de los espartales pasa por aprovechar la heterogeneidad y el resto de los procesos e interacciones ecológicas desarrolladas en su seno. Un aprovechamiento que puede a veces quedarse en el dominio de la especulación teórica.

Los ecosistemas degradados suelen presentar una funcionalidad reducida, entendida como la capacidad del ecosistema de retener y aprovechar los recursos de que dispone (suelo, agua, nutrientes), amén de generar bienes y servicios (producción de oxígeno, fijación de carbono atmosférico, mineralización de nutrientes, retención de suelo, etc.). Ramón Margalef, de la Universidad de Barcelona, propuso que un ecosistema funcional, o, como él lo llamaba, organizado, se caracteriza por una elevada homeostasis —autorregulación ante influjos externos— y reducida tasa de pérdida de recursos. Así pues, la evaluación de estas pérdidas podría utilizarse para definir el nivel de degradación de un ecosistema dado. No obstante, dicha estimación suele ser muy costosa y difícilmente practicable a una escala apropiada para la gestión.

En los espartales, la heterogeneidad espacial en la distribución de la vegetación controla la redistribución de los recursos, su retención y aprovechamiento. Por la sencilla razón de que constituye la causante última de la dinámica fuente-sumidero que hemos descrito. Si la presión humana adquiere fuerza suficiente, pueden modificarse atributos de esta heterogeneidad clave a la hora de controlar la dinámica, como la distancia entre sumideros y su tamaño. Un aumento de la distancia entre sumideros incrementaría la cantidad de agua y sedimentos transportados durante los fenómenos de escorrentía hasta niveles que pudieran exceder la capacidad de los sumideros de retenerlos. Cuando tal ocurriera, se produciría una pérdida de recursos y una disminución de la resistencia del ecosistema frente a nuevos eventos de escorrentía a medio y largo plazo. Por consiguiente, podríamos recurrir a los atributos espaciales de la vegetación para estimar de una manera sencilla y rápida la funcionalidad del ecosistema.

En esta línea, David Tongway, de CSIRO —el consejo de investigaciones científicas australiano—, propuso un sistema de evaluación que combina la información proporcionada por la disposición espacial de los sumideros y por sencillos indicadores de la condición de la superficie del suelo. Esta metodología ha sido aplicada por el autor y Jordi Cortina para evaluar el estado funcional de los espartales a lo largo de un gradiente de degradación en el sudeste ibérico. Los resultados obtenidos son prometedores y, si bien la aplicación del enfoque plantea distintos retos aún —como el calibrar la información que proporciona con medidas reales de utilización y pérdida de recursos en los espartales—, sugieren que podría resultar idóneo para caracterizar el estado funcional de los espartales ibéricos.

La información sobre el nivel de funcionalidad de los espartales reviste un interés obvio a la hora de sentar las bases de su restauración ecológica. Nos permitiría establecer de entrada un orden de prioridad en las zonas a restaurar y, luego, seleccionar el orden de restablecimiento de los componentes o funciones del ecosistema que se han perdido.

En los casos en los que el espartal está muy degradado, la restauración podría iniciarse con actuaciones encaminadas a aumentar el número de sumideros y a reducir la distancia entre los mismos, lo cual puede conseguirse de una manera sencilla y económica apilando ramas muertas en las zonas desnudas. Ello permitiría, a su vez, frenar las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión y proporcionar microambientes favorables para la germinación de distintas especies anuales y leñosas. Se ha comprobado ya la eficacia de la técnica en zonas semiáridas de Australia. Allí, Tongway y John Ludwig han demostrado que la colocación de ramas de *Acacia* en pilas mejoraba la retención de sedimentos y hojarasca, aumentaba la infiltración edáfica e incrementaba los contenidos en nutrientes y el número de invertebrados edáficos.

Posteriormente a la creación de nuevos sumideros, y una vez que esta actuación hubiera detenido los procesos degradativos y permitido recuperar cierta funcionalidad, la siguiente fase de la restauración consistiría en plantar especies arbustivas rebrotadoras, que permitirían una recuperación a medio y largo plazo de las funciones relacionadas con el reciclado de los nutrientes y facilitarían la llegada de nuevas especies vegetales y animales que encuentran en los arbustos alimento y refugio.

Las plantaciones constituyen la opción apropiada cuando el espartal no está muy degradado y mantiene cierta funcionalidad. La introducción de arbustos en los espartales debe realizarse sin alterar la vegetación existente ni la dinámica fuente-sumidero. Los plantones deben de introducirse en el microambiente proporcionado por las matas de esparto, así se aprovecharían también los procesos ecológicos naturales, la facilitación en este caso, para favorecer su introducción en zonas donde su colonización natural es extremadamente difícil en la actualidad.

Bajo ciertas condiciones de estrés ambiental, el esparto podría resistirse al establecimiento de las especies arbustivas. Justamente nuestros ensayos en espartales de Alicante indican el potencial que esta interacción encierra para promover la implantación de estas especies en espartales semiáridos degradados. Aunque no debemos silenciar que las tasas de supervivencia obtenidas en estos estudios dependían mucho de las precipitaciones durante los primeros meses tras la plantación.

En breve, las mejoras microclimáticas y edáficas introducidas por el esparto quizá no basten para garantizar la implantación de los arbustos cuando las condiciones climáticas posteriores a la plantación sean particularmente desfavorables. Deberán realizarse nuevos ensayos para conocer los umbrales de precipitación, a partir de los cuales pueden obtenerse porcentajes aceptables de supervivencia de las plantas introducidas y para evaluar el efecto combinado de la facilitación con el de otras técnicas ecotecnológicas encaminadas a disminuir las condiciones de estrés a las que se ven sometidas los plantones en el campo. Entre las técnicas aludidas merecen citarse la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante la adición de enmiendas orgánicas, el aumento de la capacidad de los plantones para captar agua y nutrientes mediante su micorrización —la simbiosis de sus raíces con hongos— en vivero y el endurecimiento hídrico de los plantones para reforzar su resistencia a la sequía.

Los espartales ibéricos han sido objeto de numerosos estudios que han permitido adquirir un conocimiento más que notable de su ecología. Pese a ello, aún existen importantes interrogantes sobre distintos aspectos. ¿Cuál es el papel que desempeñan la fauna edáfica y los microorganismos en el funcionamiento del ecosistema? ¿Qué mecanismos limitan la expansión de los arbustos en los espartales? ¿Qué dinámica a medio y largo plazo van a seguir estos ecosistemas bajo el cambio climático?

Todo ello habrá de abordarse en nuevos ensayos a realizar en los espartales, que contribuirán a mejorar nuestro conocimiento de su ecosistema. Nos parece apremiante la ejecución de proyectos piloto de gestión y restauración en los espartales, que incorporen los conocimientos adquiridos sobre su estructura y funcionamiento, habida cuenta del grado de degradación que presentan y el riesgo de desertización de las zonas que habitan.

Los proyectos deberán incluir evaluaciones a medio y largo plazo de sus costes económicos, de las dificultades logísticas y del impacto social, ya que sólo así podrá avanzarse en el establecimiento de medidas de gestión y restauración viables ecológica, económica y socialmente. La implantación de tales medidas contribuiría a conservar y mejorar el estado de uno de los ecosistemas más singulares y representativos de las zonas más áridas de la cuenca mediterránea: las estepas dominadas por el esparto o atocha.

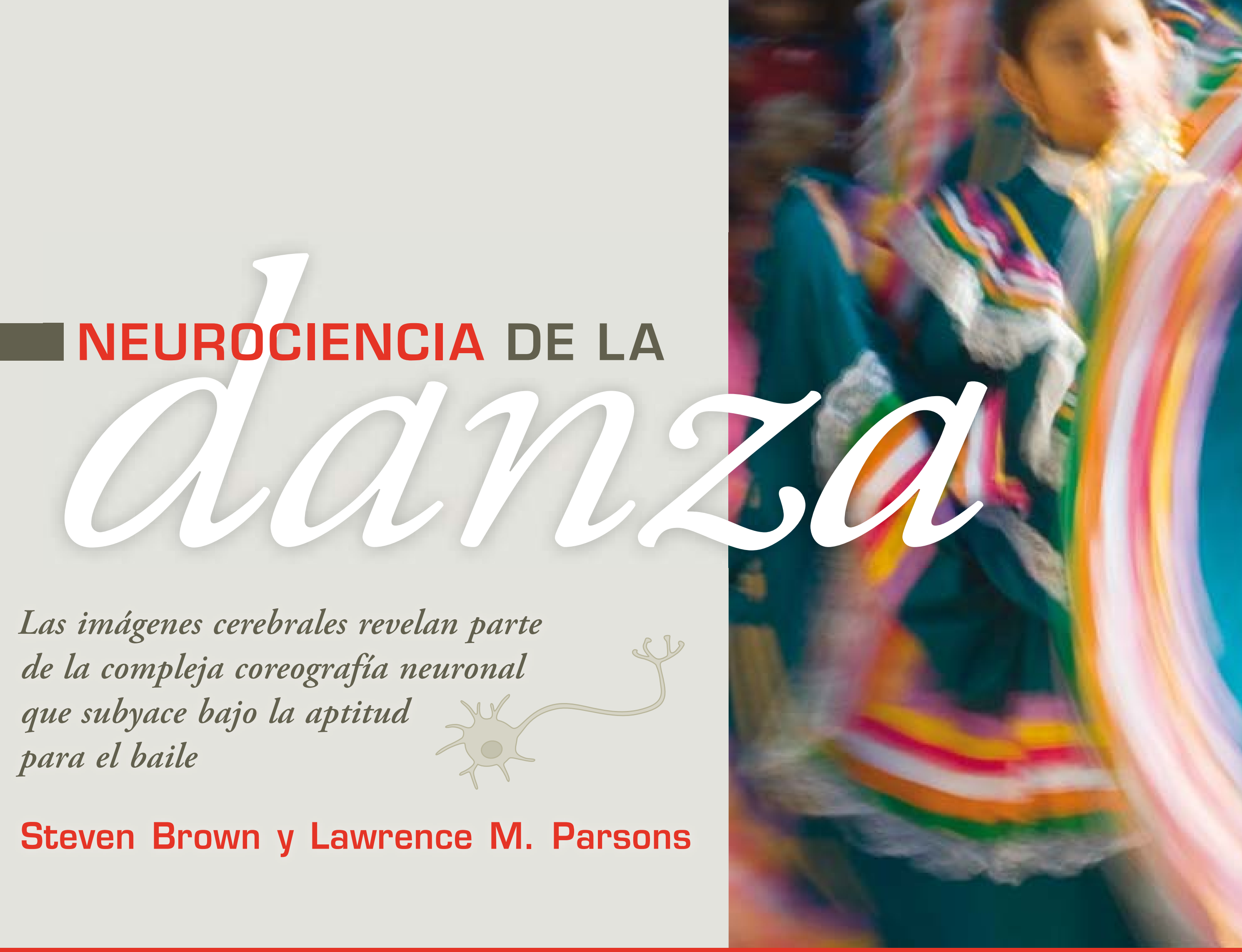
Bibliografía complementaria

SCALES AND PROCESSES OF WATER AND SEDIMENT REDISTRIBUTION IN DRYLANDS: RESULTS FROM THE RAMBLA HONDA FIELD SITE IN SOUTHEAST SPAIN. J. Puigdefábregas, A. Solé-Benet, L. Gutiérrez, G. Del Barrio y M. Boer en *Earth-Science Reviews*, vol. 48, págs. 39-70; 1999.

LA RESTAURACION DE LA CUBIERTA VEGETAL EN ZONAS SEMIARIDAS EN FUNCION DEL PATRON ESPACIAL DE FACTORES BIOTICOS Y ABIOTICOS. F. T. Maestre. Fundación Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2002.

POSITIVE, NEGATIVE AND NET EFFECTS IN GRASS-SHRUB INTERACTIONS IN SEMIARID MEDITERRANEAN STEPPES. F. T. Maestre, S. Bautista y J. Cortina en *Ecology*, vol. 84, págs. 3186-3197; 2003.

ON THE IMPORTANCE OF PATCH ATTRIBUTES, ABIOTIC FACTORS AND PAST HUMAN IMPACTS AS DETERMINANTS OF PLANT SPECIES RICHNESS AND DIVERSITY IN MEDITERRANEAN SEMI-ARID STEPPES. F. T. Maestre en *Diversity and Distributions*, vol. 10, págs 21-29; 2004.



NEUROCIENCIA DE LA *danza*

Las imágenes cerebrales revelan parte de la compleja coreografía neuronal que subyace bajo la aptitud para el baile

Steven Brown y Lawrence M. Parsons

CONCEPTOS BASICOS

- La danza constituye una forma fundamental de expresión humana. Probablemente evolucionó con la música como una forma de generar ritmo.
- Requiere especiales aptitudes mentales. Una zona del cerebro alberga una representación de la orientación corporal, que nos ayuda a movernos a través del espacio en la dirección adecuada. Otra opera a modo de sincronizador: nos permite acompasar el movimiento con la música.
- Una sincronización inconsciente (el proceso que nos hace marcar distraídamente un ritmo con los pies) refleja nuestro instinto para la danza. Se produce cuando dialogan ciertas regiones cerebrales subcorticales, prescindiendo de áreas auditivas superiores.

Es tan natural el sentido del ritmo, que solemos darlo por descontado. Al escuchar música llevamos el compás con los pies y movemos el cuerpo, a menudo de forma inconsciente. Este instinto corresponde a un rasgo evolutivo propio de la especie humana. No se presenta en ningún otro mamífero ni, probablemente, en ninguna otra clase del reino animal. Las aptitudes para esa sincronización inconsciente residen en la base de la danza, confluencia de movimiento, ritmo y representación gestual. La danza corresponde al ejercicio colectivo más sincronizado que existe; exige un tipo de coordinación interpersonal en el espacio y el tiempo que apenas se da en otros contextos sociales.

Aun cuando la danza constituye una forma fundamental de la expresión humana, la neurociencia no le había prestado particular atención hasta hace poco, cuando empezaron a examinarse imágenes cerebrales de bailarines aficionados y profesionales. Entre otras cuestiones, se pretendía averiguar de qué manera se mueve un bailarín por el espacio, cómo controla sus pasos y cómo aprende coreografías complejas. Los resultados permiten entrever la intrincada coordinación mental que se requiere para ejecutar hasta los pasos más sencillos.

Ritmo interno

Hasta ahora se habían analizado movimientos aislados, como la rotación del tobillo o el tamborileo de los dedos. Se ha determinado así el modo en que orquesta el cerebro acciones sencillas. Saltar a la pata coja, por ejemplo, requiere entre otras cosas que el sistema cerebral sensomotor ejecute cálculos relativos a la percepción espacial, el equilibrio, la intención y la secuencia temporal. En una versión simplificada del proceso, la corteza parietal posterior del cerebro traduce en órdenes motoras la información visual, con lo que envía señales a las zonas donde se planifica el movimiento en la corteza premotora y el área motora suplementaria. Esas instrucciones se proyectan luego a la corteza motora primaria, que genera impulsos neuronales que se desplazan a la médula espinal y, después, a los músculos para hacer que éstos se contraigan.

Al propio tiempo, los órganos sensoriales de los músculos proporcionan al cerebro una realimentación que comunica la orientación espacial del cuerpo a través de nervios que atraviesan la médula espinal hacia la corteza cerebral. Los circuitos subcorticales en el cerebelo y en los ganglios basales del núcleo cerebral ayudan también a actualizar las órdenes motoras basadas en la realimentación sensorial y a refinar nuestros movimientos. Todavía no está claro que esos mecanismos neuronales puedan ampliarse de escala para explicar la ejecución de figuras tan gráciles como una pirueta, por ejemplo.

Para indagar en ese asunto, conjuntamente con Michael J. Martínez, de la facultad de medicina de la Universidad de Texas en San Antonio, acometimos el primer estudio de los movimientos de la danza mediante técnicas de formación de imágenes. A diez bailarines de tango aficionados (cinco varones y cinco mujeres) se les aplicó la tomografía por emisión de positrones (TEP). Esta técnica registra los cambios en la circulación sanguínea en el cerebro consecutivos a cambios en la actividad cerebral. El aumento de flujo sanguíneo en una región determinada se atribuye a una mayor actividad entre las neuronas de aquella zona.

Los sujetos, tendidos dentro del escáner con la cabeza inmóvil, podían mover las piernas y deslizar los pies sobre una superficie inclinada. Primeramente les pedimos que ejecutaran un "box step", de forma que ajustaran sus movimientos al ritmo de las piezas instrumentales que escuchaban por auriculares. (El "box step" corresponde a una figura de seis pasos que define el perímetro de un cuadrado; deriva del paso básico de "salida" del tango argentino.) En la siguiente exploración, los bailarines flexionaban los músculos de las piernas al compás de la música, pero sin moverlas de un lado a otro. La actividad cerebral debida a esa mera flexión se sustrajo de la que se había registrado cuando "bailaban"; así pudimos apuntar a las zonas cerebrales que resultan vitales para dirigir a través del espacio las piernas y generar patrones de movimiento específicos.

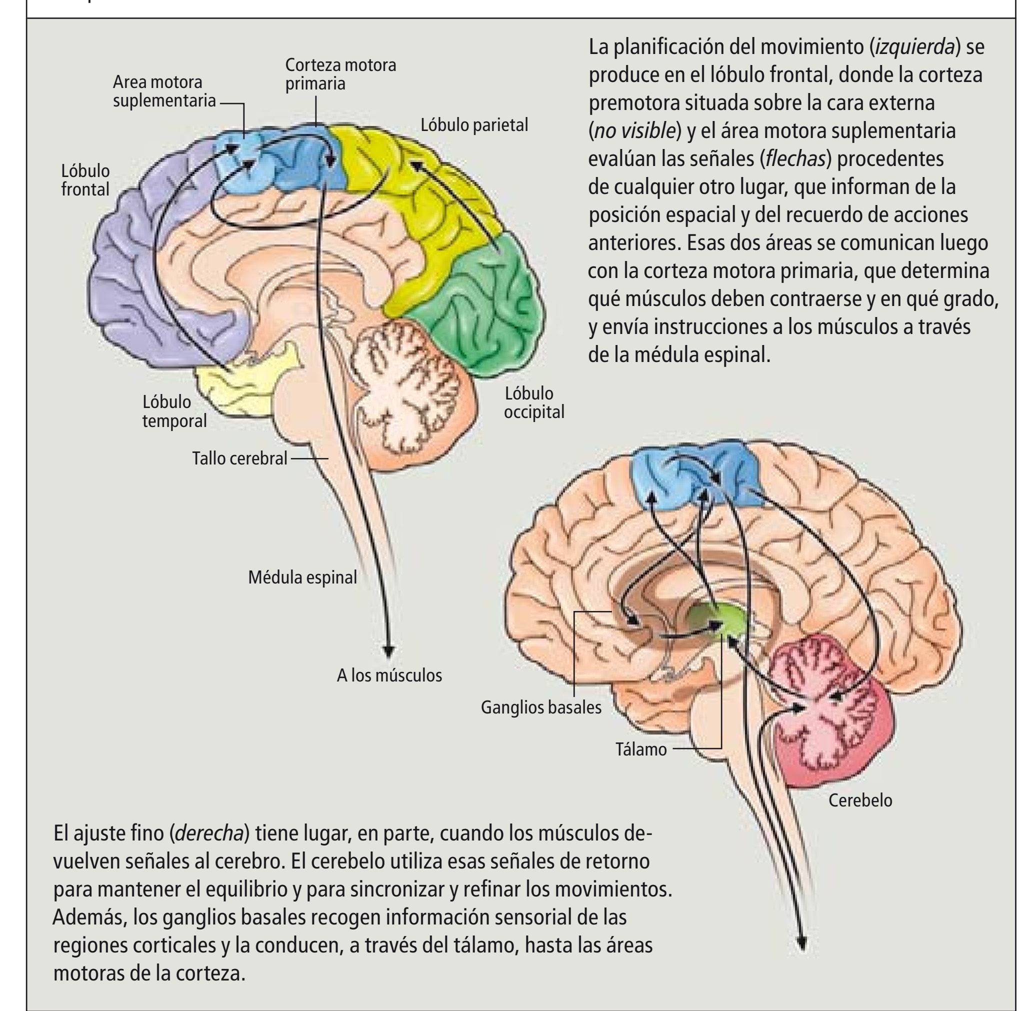
De acuerdo con lo previsto, esa sustracción eliminó muchas de las áreas motoras básicas del cerebro. Se mantuvo, sin embargo, una



1. LA DANZA es la actividad que requiere mayor sincronización de todas. Los neurocientíficos tratan de descubrir de qué modo se desarrolla y a qué causas obedece.

CONTROL CEREBRAL DEL MOVIMIENTO

Para identificar las áreas del cerebro que controlan la danza, lo primero que debemos averiguar es el modo en que el cerebro nos permite, en general, realizar movimientos deliberados. Se presenta aquí una versión simplificada de ese mecanismo motor.



La planificación del movimiento (*izquierda*) se produce en el lóbulo frontal, donde la corteza premotora situada sobre la cara externa (*no visible*) y el área motora suplementaria evalúan las señales (*flechas*) procedentes de cualquier otro lugar, que informan de la posición espacial y del recuerdo de acciones anteriores. Esas dos áreas se comunican luego con la corteza motora primaria, que determina qué músculos deben contraerse y en qué grado, y envía instrucciones a los músculos a través de la médula espinal.

El ajuste fino (*derecha*) tiene lugar, en parte, cuando los músculos devuelven señales al cerebro. El cerebelo utiliza esas señales de retorno para mantener el equilibrio y para sincronizar y refinar los movimientos. Además, los ganglios basales recogen información sensorial de las regiones corticales y la conducen, a través del tálamo, hasta las áreas motoras de la corteza.

BENEFICIOS DEL TANGO

En un estudio publicado en diciembre de 2007, Gammon M. Earhart y Madeleine E. Hackney, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington en San Luis, informaban que bailar tango mejoraba la movilidad en pacientes con parkinson. Esta patología se debe a una pérdida de neuronas en los ganglios basales, que interrumpe los mensajes dirigidos a la corteza motora. Quienes la sufren padecen temblores, rigidez y dificultades para iniciar los movimientos que desean.

Se descubrió que, tras veinte clases de tango, los pacientes quedaban agarrotados con menor frecuencia. Comparados con los que habían recibido en su lugar clases de gimnasia, los bailarines de tango demostraron mejor equilibrio y mejores puntuaciones en las pruebas de levantarse y andar ("Get Up and Go"), que miden el grado de inestabilidad y, por tanto, identifican a quienes corren mayor riesgo de caídas.



parte del lóbulo parietal que contribuye, en humanos y en otros mamíferos, a la percepción espacial y a la orientación. La cognición espacial en la danza es fundamentalmente cinestésica; percibimos la posición del torso y las extremidades en todo momento, incluso con los ojos cerrados, gracias a los órganos sensoriales de los músculos. Tales órganos indexan la rotación de cada articulación y la tensión de cada músculo; transmiten luego esa información al cerebro, que genera en respuesta una representación articulada del cuerpo. En concreto, observamos una activación del precuneo, región del lóbulo parietal muy próxima al lugar donde reside la representación cinestésica de las piernas. Creemos que el precuneo alberga un mapa cinestésico que permite percibir la posición espacial del cuerpo mientras uno se mueve por sus alrededores. Tanto si se baila un vals como si se camina en línea recta, el precuneo ayuda a trazar la trayectoria desde una perspectiva "egocéntrica", centrada en el propio cuerpo.

A continuación, comparamos las imágenes obtenidas del baile con otras en que los sujetos bailaban tango sin acompañamiento musical. Mediante la eliminación de las regiones cerebrales activadas por las dos tareas, esperábamos descubrir zonas que resultaran esenciales para la sincronización del movimiento con la música. Una vez más, la sustracción descartó las áreas motoras del cerebro. La diferencia principal se producía en la parte del cerebelo que recibe señales de la médula espinal, el vermis anterior. Aunque esa región intervenía en ambas situaciones, el flujo sanguíneo era superior cuando los pasos de baile se sincronizaban con la música que cuando se bailaba a un ritmo de creación propia.

Si bien preliminares, nuestros resultados abonan la hipótesis de que esta parte del cerebelo actúa como un director de orquesta que

TAMI TOLPA; PETER McBRIDE *Aurora Photos* (*bailarines*)

controla la información a través de diversas regiones cerebrales para coordinar a todos los músicos [*véase* "Reconsideración del cerebelo", de James M. Bower y Lawrence M. Parsons; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2003]. El cerebelo en su conjunto satisface todos los requisitos de un buen metrónomo neuronal. Recibe un vasto conjunto de señales sensoriales de los sistemas corticales auditivo, visual y somatosensorial, una capacidad necesaria para provocar movimientos en respuesta a diversos estímulos, ya sean sonoros, luminosos o táctiles; el cerebelo expresa también representaciones sensomotoras del cuerpo entero.

Nuestro segundo análisis aclaró la tendencia humana natural a marcar de forma inconsciente con los pies el ritmo de la música. Al comparar los escanogramas de los dos experimentos (baile con música y baile sin música), descubrimos que, en la parte inferior de la vía auditiva, se iluminaba una estructura subcortical llamada núcleo geniculado medial sólo cuando los bailarines sincronizaban sus movimientos con la música. Al principio, supusimos que se trataba de un simple reflejo de la presencia de un estímulo auditivo (la música). Sin embargo, otra serie de escanogramas de control nos hizo descartar esa hipótesis: cuando los sujetos escuchaban música, pero no movían las piernas, no detectamos cambios del flujo sanguíneo en el citado núcleo geniculado.

En conclusión, la actividad del núcleo geniculado guarda relación con la sincronización, no con la simple escucha. Este hallazgo nos llevó a formular la siguiente hipótesis: se produce una sincronización inconsciente cuando un mensaje neuronal auditivo se proyecta directamente al circuito de audición y regulación temporal del cerebelo, evitando pasar por áreas auditivas de nivel superior en la corteza cerebral.

¿Sabrías bailarlo?

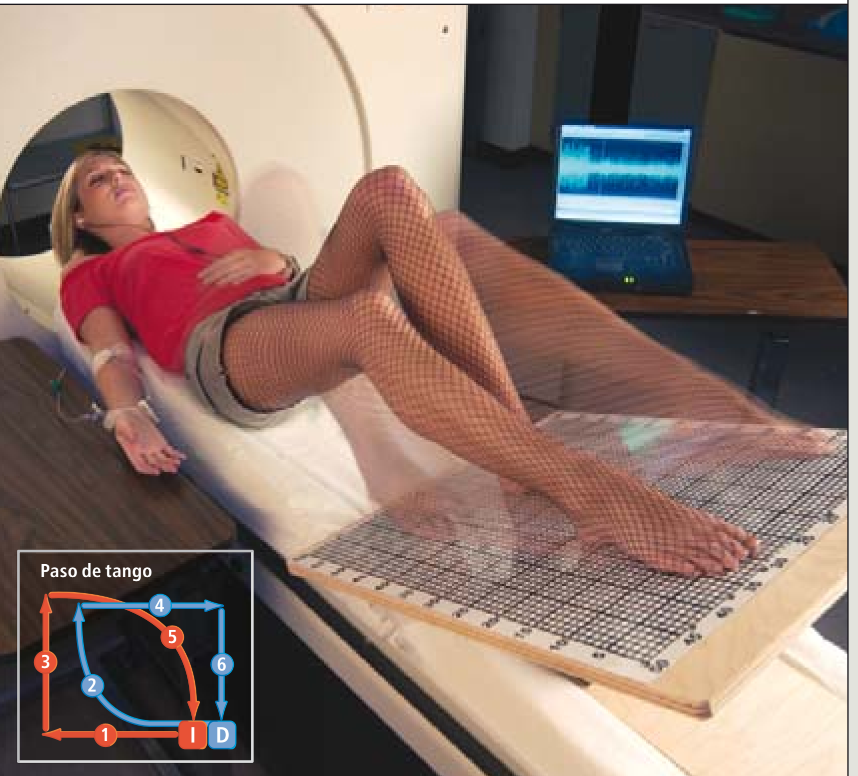
En la observación y el aprendizaje de la danza intervienen otras regiones cerebrales. Beatriz Calvo Merino, Patrick Haggard y sus colaboradores, del Colegio Universitario de Londres, investigaron si ciertas áreas cerebrales se activaban cuando alguien contemplaba la ejecución de un baile que conocía bien. Con ello se proponían averiguar si hay regiones del cerebro de un bailarín de ballet que se activen cuando

Los autores

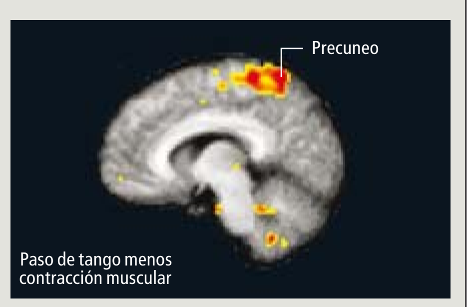
Steven Brown dirige el NeuroArts Lab en el departamento de psicología, neurociencia y conducta de la Universidad McMaster en Ontario. Centra su investigación en la base neuronal de las comunicaciones humanas: habla, música, gestos, danza y emociones. **Lawrence M. Parsons** es profesor del departamento de psicología en la Universidad de Sheffield. Estudia la función del cerebro y la neurociencia de la ejecución a dúo, el diálogo y la inferencia deductiva.

JUEGOS DE PIES

Los autores se propusieron localizar las zonas del cerebro implicadas en la danza. Los sujetos de la prueba fueron introducidos en un escáner TEP; tenían la cabeza inmovilizada, pero escuchaban música de tango a través de cascos y podían mover las piernas sobre una superficie inclinada.







La máquina exploró el cerebro en dos situaciones: en una, los bailarines flexionaban las piernas al compás de la música, pero sin moverlas de una lado a otro; en la otra, ejecutaban con las piernas un paso básico de tango (*inserto*), también al ritmo de la música. Al sustraer la actividad cerebral debida a la contracción muscular (*arriba*) de la producida por el paso de tango, quedó "iluminado" el precuneo, una parte del lóbulo parietal (*abajo*).

CORTESIA DE LAWRENCE M. PARSONS (*sujeto en el escáner*); LUCY READING IKKANDA (*ilustración*); DE "THE NEURAL BASIS OF DANCE", POR STEVEN BROWN Y OTROS, EN *CEREBRAL CORTEX*, VOL. 16, N.º 8; 2006 (*imágenes del cerebro*)

¿MEJORA EL EQUILIBRIO EL BALLET?

Según Roger W. Simmons, de la Universidad estatal de San Diego, cuando un bailarín de ballet pierde el equilibrio, se endereza con mayor prontitud que los no entrenados, gracias a que sus nervios y músculos responden antes a las alteraciones. Un cerebro que ha aprendido danza actualiza con mayor agilidad la información que recibe del cuerpo.

presencian una coreografía de ballet pero no, por ejemplo, de capoeira (danza afrobrasileña derivada de un arte marcial).

Tomaron imágenes por resonancia magnética de bailarines de ballet, danzantes de capoeira y gente que no sabía bailar, mientras contemplaban videoclips de tres segundos, mudos, de pasos de ballet o movimientos de capoeira. Quedó claro que la maestría influía en la corteza premotora: aumentaba la actividad en esa zona sólo cuando los sujetos observaban danzas que se sentían capaces de ejecutar. Otros trabajos ofrecen explicaciones verosímiles. Se ha descubierto que, al presenciar acciones sencillas, se activan las zonas de la corteza premotora implicadas en la realización de tales acciones, de donde se desprende que reproducimos mentalmente lo que estamos viendo (una práctica que podría facilitar el aprendizaje y la comprensión de movimientos nuevos). Los investigadores examinan hasta qué punto el ser humano depende de esos circuitos de imitación.

En el seguimiento posterior, Calvo Merino y sus colaboradores compararon el cerebro de bailarines de ballet varones y mujeres mientras contemplaban escenas de bailarines o bailarinas en la ejecución de pasos de danza propios de su género. Una vez más, los mayores niveles de actividad en la corteza premotora correspondían a varones que contemplaban pasos de bailarines y a mujeres que observaban pasos concebidos para bailarinas.

La capacidad de realizar mentalmente un movimiento de danza resulta esencial para el aprendizaje de habilidades motoras. En 2006, Emily S. Cross, Scott T. Grafton y su grupo, del Colegio Dartmouth, pensaron que los circuitos de imitación cerebrales aumentaban su actividad durante el aprendizaje. A lo largo de varias semanas, el equipo realizó escanogramas por resonancia magnética de bailarines que estaban aprendiendo una coreografía compleja de baile moderno. Durante esas sesiones, los sujetos contemplaban grabaciones de cinco segundos sobre pasos de baile que ellos dominaban o bien otros que desconocían. Después de cada proyección, los sujetos puntuaban el nivel de perfección que creían poder alcanzar en la ejecución de los pasos que habían presenciado. Se confirmaron así los hallazgos del grupo de Calvo Merino. La actividad en la corteza premotora aumentaba durante el ejercicio y mostraba una clara correlación con la capacidad del sujeto para bailar el fragmento contemplado.

Lo que ambas investigaciones ponen de relieve es que el aprendizaje de una secuencia motora compleja no activa sólo un sistema motor directo que controla las contracciones musculares, sino también un sistema de planificación motora que contiene información sobre la aptitud corporal para realizar un movimiento determinado. Cuanta mayor destreza adquirimos en un patrón coreográfico, mejor imaginamos las sensaciones asociadas y probablemente menos esfuerzo nos costará ejecutarlo.

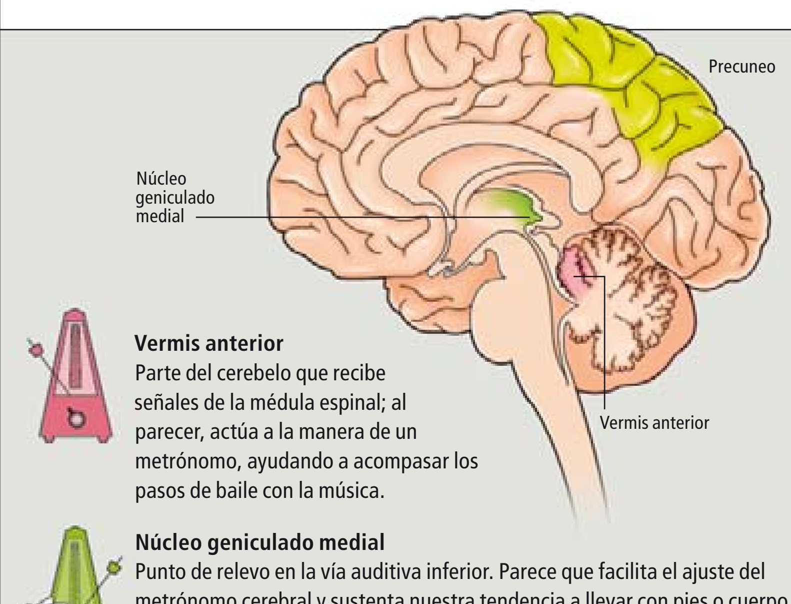
Sin embargo, nuestros trabajos revelan que la capacidad de simular mentalmente una secuencia de danza —o un servicio de tenis o un *swing* de golf— no es simplemente visual, como pudieran sugerir esos análisis, sino también cinestésica. De hecho, el verdadero dominio de la danza exige una percepción muscular y una imagen motora de la secuencia en cuestión, como si fueran reales, en las áreas cerebrales donde se planifica el movimiento.

Función social

¿Por qué bailamos? Acaso sea ésta la cuestión más fascinante. La danza guarda una estrecha relación con la música. En numerosos casos, la danza genera sonido. Los danzarines aztecas visten unas polainas con chachayotes (semillas de ayoyote) que suenan en cada paso. En

COREOGRAFIA MENTAL

Los autores descubrieron que las siguientes regiones cerebrales contribuyen a la danza; lo hacen de una forma que trasciende la mera ejecución del movimiento.



Vermis anterior
Parte del cerebelo que recibe señales de la médula espinal; al parecer, actúa a la manera de un metrónomo, ayudando a acompasar los pasos de baile con la música.

Núcleo geniculado medial
Punto de relevo en la vía auditiva inferior. Parece que facilita el ajuste del metrónomo cerebral y sustenta nuestra tendencia a llevar con pies o cuerpo el ritmo de la música. Reaccionamos de forma inconsciente porque esta región se conecta al cerebelo, comunicándole información básica sobre el ritmo, sin tener que "hablar" con áreas auditivas superiores de la corteza.

Precuneo
Contiene una cartografía sensorial del propio cuerpo; ayuda a trazar la trayectoria de un bailarín desde una perspectiva centrada en el cuerpo, o egocéntrica.

TAMI TOLPA; NANCY BROWN *Getty Images* (*piernas de bailarina*)





2. LOS DANZARINES AZTECAS de Ciudad de México calzan polainas con chachayotes, unas semillas que resuenan a cada paso (*detalle*). En numerosas culturas, los bailarines llevan en el cuerpo o la ropa objetos que hacen ruido. Es casi seguro que la danza y la música han evolucionado conjuntamente como formas de generar ritmo. Pero la danza transmite ideas con mayor claridad que la música; probablemente la danza constituyó una forma primitiva de lenguaje.

KEVIN FLEMING *Corbis* (*danzarines*); DAVID MCNEW *Getty Images* (*chachayotes*)

muchas otras culturas, la gente lleva encima objetos que hacen ruido al bailar, como palillos, cuentas o castañuelas. Palmeos, zapateos y chasquidos de dedos son también frecuentes. Por todo ello, proponemos una hipótesis de "percusión corporal": la danza comenzó siendo un fenómeno sonoro; luego, danza y música (sobre todo la de percusión) siguieron una evolución conjugada como formas complementarias de crear ritmo. Los primeros instrumentos de percusión pudieran haber sido parte de los atavíos danzantes, no muy distintos de los chachayotes aztecas.

En comparación con la música, la danza posee una mayor capacidad de representación e imitación. Ello sugiere que quizá constituyó una forma primitiva de lenguaje. De hecho, la danza vendría a ser la quintaesencia del lenguaje de signos. Cabe señalar que, durante todo nuestro estudio sobre el movimiento, observamos que se activaba una región del hemisferio derecho correspondiente al área de Broca del hemisferio izquierdo. El área de Broca constituye una parte del lóbulo frontal que clásicamente se asocia a la producción del habla. En el decenio pasado se descubrió que esa zona contiene también una representación de las manos.

El hallazgo refuerza la teoría gestual de la evolución del lenguaje. Los partidarios de la misma sostienen que el lenguaje evolucionó a partir de un sistema de gestos inicial hasta adquirir expresión vocal. Nuestro trabajo demuestra que el movimiento de las piernas activa la región del hemisferio derecho homóloga al área de Broca, lo que refuerza la hipótesis de que la danza comenzó siendo una forma de comunicación.

¿Qué función podría desempeñar en la aptitud para la danza el área homóloga a la de Broca? La respuesta no parece afectar directamente al habla. En 2003, Marco Iacoboni, de la Universidad de California en Los Angeles, y sus colaboradores aplicaron estimulación cerebral magnética para interrumpir la función del área de Broca o de su homóloga. En uno y otro caso, los sujetos tratados mostraron mayor dificultad para imitar movimientos digitales con su mano derecha. Dedujeron que esas áreas eran esenciales para la imitación, facultad imprescindible para el aprendizaje y la transmisión de la cultura.

Nosotros presentamos otra hipótesis. Aunque nuestro estudio no incluyera movimientos propiamente imitativos, la ejecución de pasos de tango y la imitación de movimientos digitales exigen que el cerebro ordene la realización de series complejas de movimientos interdependientes. Igual que el área de Broca desempeña una función esencial en la sintaxis del lenguaje, podría también servir para encadenar unidades de movimiento en coreografías.

Esperamos que las futuras investigaciones basadas en técnicas de formación de imágenes arrojen luz sobre los mecanismos cerebrales que subyacen bajo la danza y su evolución, profundamente relacionada con la aparición del lenguaje y de la música. Consideramos que en la danza confluyen la capacidad representativa del lenguaje y el carácter rítmico de la música. Esa interacción nos permite contar relatos utilizando la expresión corporal y sincronizar nuestro movimiento con el de los demás de una manera que favorece la cohesión social.

Bibliografía complementaria

ACTION OBSERVATION AND ACQUIRED MOTOR SKILLS: AN FMRI STUDY WITH EXPERT DANCERS. Beatriz Calvo Merino, Daniel E. Glaser, Julie Grèzes, Richard E. Passingham y Patrick Haggard en *Cerebral Cortex*, vol. 15, n.º 8, págs. 1243-1249; agosto de 2005.

BUILDING A MOTOR SIMULATION DE NOVO: OBSERVATION OF DANCE BY DANCERS. Emily S. Cross, Antonia F. de C. Hamilton y Scott T. Grafton en *Neuroimage*, vol. 31, n.º 3, págs. 1257-1267; 1 de julio de 2006.

THE NEURAL BASIS OF HUMAN DANCE. Steven Brown, Michael J. Martínez y Lawrence M. Parsons en *Cerebral Cortex*, vol. 6, n.º 8, págs. 1157-1167; agosto de 2006.

SEEING OR DOING? INFLUENCE OF VISUAL AND MOTOR FAMILIARITY IN ACTION OBSERVATION. Beatriz Calvo Merino, Daniel E. Glaser, Julie Grèzes, Richard E. Passingham y Patrick Haggard en *Current Biology*, vol. 16, n.º 19, págs. 1905-1910; 10 de octubre de 2006.

El problema de Newcomb

Cómo proceder en un mundo en el que se recompense a la irracionalidad

Agustín Rayo

En la habitación de al lado hay dos cajas: una grande y otra pequeña. La pequeña contiene mil euros. Sobre el contenido de la grande se sabe lo siguiente: o contiene un millón de euros o está vacía. Tiene usted dos opciones: llevarse las dos cajas, o llevarse sólo la grande. ¿Qué prefiere?

La decisión parece sencillísima. ¿Qué ventaja podría tener dejar los mil euros? Esté el millón en la caja grande o no, terminará usted con más dinero si se lleva también la pequeña.

Es natural pensar que esta conclusión es independiente del método que se utilizó para decidir cuánto dinero poner en la caja grande. Pero imaginemos lo siguiente. Ayer estuvo aquí un experto en personalidades, y se le pidió que tratara de determinar —con base en un acervo de información sobre su persona— si es usted *unicajista* (es decir, el tipo de persona que se llevaría sólo la caja grande en una situación como ésta) o *bicajista* (es decir, el tipo de persona que se llevaría las dos cajas en una situación como ésta). Si el experto dictaminó que es usted unicajista, la caja grande se llenó con el millón de euros; si dictaminó que es usted bicajista, la caja grande se dejó vacía. Las cajas han permanecido selladas desde ayer por la noche, y permanecerán selladas hasta que usted se las lleve. Si la caja grande fue llenada con el millón ayer por la noche, seguirá conteniendo el millón independientemente de lo que usted decida; y si fue dejada vacía ayer por la noche, permanecerá vacía independientemente de lo que usted decida.

Una última observación: el experto es altamente fiable. Ha intervenido en numerosos dictámenes de este tipo, y sabemos que acierta el 99,9 % de las veces. Es casi seguro, por tanto, que haya dictaminado acertadamente en este caso. Tenemos, pues, la siguiente información: si se decide usted por las dos cajas, es casi seguro (99,9 %) que la caja grande esté vacía; y si se decide usted sólo por la caja grande, es casi seguro (99,9 %) que contenga el millón.

Antes de saber del experto, parecía claro que lo correcto es ser bicajista. Pero ahora sabemos que si se lleva usted sólo la caja grande es casi seguro que termine con un millón de euros; y si se lleva las dos cajas, es casi seguro que termine con mil euros. ¿No sería mejor ser unicajista después de todo?

El dilema de si uno debe ser unicajista o bicajista se conoce como *Problema de Newcomb*, en honor a su descubridor, William Newcomb (físico teórico del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, antes de su muerte en 1999). El problema captó la imaginación de la comunidad intelectual en el último tercio del siglo XX, en buena medida gracias a los escritos de Robert Nozick (profesor de filosofía en Harvard antes de su muerte en 2002) y Martin Gardner (columnista de *Investigación y Ciencia*).

La primera vez que uno oye hablar de la Paradoja de Newcomb es usual quejarse de que no podría existir un experto como el que requiere la historia. Pero, ¿por qué no? ¿Qué tal si el experto produce un clon del cerebro del lector y hace su dictamen sobre la base de lo que decida el clon? Si a usted y al clon se les someten los mismos estímulos, cualquier reflexión que haga usted la habrá hecho también el clon, y cualquier decisión que tome usted la habrá tomado también el clon.

Si no le convence la ciencia ficción, permítame decirle que cada año invito a mis alumnos de licenciatura a que participen en una variación del experimento —¡con cajas y dinero de verdad!— y acierto aproximadamente el 85 % de las veces. Imagine que está cursando *Paradojas e Infinitos* en el MIT y que el profesor ha puesto dos cajas sobre el escritorio... ¿Se lleva usted ambas o se lleva sólo la grande?

Para que el Problema de Newcomb sea interesante no se requiere un experto particularmente fiable. Basta con suponer que acierta más del 50,05 % de las veces. Veamos por qué.

Supongamos que nos es posible actuar de varias maneras, y que queremos saber cuál de nuestras opciones es la más racional. De acuerdo con la teoría estándar de la decisión, debemos escoger la opción que tenga el mayor *valor esperado*. El valor esperado de una acción constituye una medida de cuán deseable se cree que será el mundo bajo el supuesto de que se lleva a cabo la acción. Consideremos una acción cualquiera, tirar una moneda, por ejemplo. Si emprendemos la acción las cosas podrían resultar de diferentes maneras: la moneda podría caer en cara y podría caer en cruz. Si le asignamos un *valor* a cada una de estas posibilidades —una medida de lo deseable que es para nosotros—, entonces el valor esperado de la acción es el resultado de *promediar* los valores de las diferentes posibilidades (donde el peso que se le asigna a cada posibilidad al promediar es proporcional a lo probable que creemos que será esa posibilidad bajo el supuesto de que realizamos la acción). Supongamos que recibiremos 3 euros si la moneda cae en cara y 7 si la moneda cae en cruz. Entonces el valor esperado de tirar la moneda es $(3 \times 1/2) + (7 \times 1/2) = 5$ euros. (Tanto aquí como más adelante simplifico las cosas presuponiendo que valor equivale a dinero recibido.) Consideremos ahora la ac-

¿Quiere saber más?

Para saber cómo están relacionados el Problema de Newcomb y el Dilema del Prisionero, recomiendo "Prisoners' Dilemma is a Newcomb Problem", de David Lewis en *Philosophy and Public Affairs*, vol. 8, págs. 235-240; 1979.

Para saber qué teoría de la decisión usaría un bicajista, recomiendo "Causal Decision Theory", también de David Lewis en *Australasian Journal of Philosophy*, vol. 59, págs. 5-30; 1981.

Los dos artículos están reimpresos en *Philosophical Papers*, vol. 2, de David Lewis. Oxford University Press, 1986.



ción de tirar un cierto dado: si cae en seis recibiremos 24 euros; si cae en cualquier otro número no recibiremos nada. El valor esperado de tirar el dado es (24 × × 1/6) + (0 × 5/6) = 4 euros. Si pudiéramos escoger entre tirar la moneda y tirar el dado, ¿qué deberíamos hacer? De acuerdo con el principio de maximización del valor esperado, deberíamos escoger la moneda (5 euros es más que 4).

Volvamos al Problema de Newcomb. ¿Cuáles son los valores esperados para el unicajista y el bicajista? Si p es la probabilidad de que el experto acierte, el valor esperado de llevarse sólo la caja grande es (1.000.000 × p) + [0 × (1 – p)], y el valor esperado de llevarse las dos cajas es (1000 × p) + [1.001.000 × (1 – p)]. De esto se sigue que siempre que p esté por encima de 50,05 %, llevarse sólo la caja grande tendrá mayor valor esperado que llevarse las dos cajas. (Cuando p es 85 %, por ejemplo, el valor esperado de llevarse sólo la caja grande es 850.000 euros, y el de llevarse las dos es 151.000.) Aunque los expertos que aciertan el 99 % de las veces existan sólo en la ciencia ficción, no es difícil encontrar un experto que acierte más del 50,05 % de las veces —¡yo soy tal experto!— y eso es suficiente para que el principio de maximización esperada recomiende ser unicajista.

¿Qué concluir? ¿Debemos aceptar el principio de maximización del valor esperado, y ser unicajistas? ¿O debemos rechazar el principio, y entregarnos al bicajismo? Hoy día, la mayoría de los filósofos creen que el unicajismo es irracional, y rechazan el principio de maximización del valor esperado. (¡No todos! Uno de mis colegas en el MIT —una de las personas más inteligentes que conozco— cree que cuando p es 100 % lo racional es ser unicajista.)

Para ver por qué los filósofos suelen favorecer el bicajismo es útil recurrir a una analogía. Imaginemos que un cierto gen tiene dos efectos: (1) garantiza que uno sufrirá una enfermedad terrible, que sólo padecen quienes tienen el gen; y (2) eleva la probabilidad de que uno se aficione por las matemáticas. (Sabemos también que la afición por las matemáticas no es causa de la enfermedad.) Susana no sabe si tiene el gen o no, pero de pronto comienza a sentir una curiosidad bestial por saber más acerca de las matemáticas. ¿Qué hacer? ¿Debe luchar en contra de su curiosidad y evitar las matemáticas a toda costa? ¡Por supuesto que no! Si porta el gen, no hay nada que pueda hacer al respecto ahora; es mejor que disfrute de la vida mientras esté sana, aficionándose por las matemáticas. Y si no tiene el gen, no tiene de qué preocuparse. La afición por las matemáticas no va a cambiar su constitución genética, y no va a ser causa de la enfermedad. ¡Lo que debe hacer Susana es aficionarse por las matemáticas!

Este ejemplo ilustra la diferencia entre dependencia probabilística y dependencia causal. La enfermedad depende *probabilísticamente* de la afición por las matemáticas (porque el porcentaje de aficionados que padecen de la enfermedad es más alto que el porcentaje de personas que padecen de la enfermedad), pero no depende *causalmente* de la afición por las matemáticas (porque la afición no es causa de la enfermedad). Lo que tenemos es una causa común: el gen desempeña un papel causal lo mismo en la enfermedad que en la afición. Algo similar ocurre en el Problema de Newcomb. El que la caja grande contenga un millón de euros depende probabilísticamente de la decisión del lector (porque el experto es altamente fiable), pero no depende causalmente de su decisión (porque las cajas permanecerán selladas hasta que se las lleve). También aquí tenemos una causa común: su constitución psicológica desempeña una función causal lo mismo en el dictamen del experto que en su elección. La razón por la que el principio de maximización del valor esperado es defectuoso —diría un bicajista— es que está basado en la dependencia probabilística en lugar de en la dependencia causal.

Aun cuando esté uno convencido del bicajismo, es difícil escapar de la tentación de ser unicajista. Imaginemos que un multimillonario se presenta en nuestro pueblo y nos ofrece a todos participar en Problemas de Newcomb. Al cabo del primer día, nuestros amigos unicajistas están felices. Todos se encontraron con el millón de euros en la caja grande, y se han pasado la noche festejando. Nuestros amigos bicajistas, en cambio, están desconsolados. Todos se encontraron con la caja grande vacía, y aunque mil euros nunca vienen mal, no es lo mismo mil que un millón mil. El segundo día nos toca a nosotros participar. Habiendo quedado convencidos por la comunidad filosófica de que lo correcto es ser bicajista, nos llevamos las dos cajas, y —predeciblemente— nos encontramos con la caja grande vacía. Nuestros amigos unicajistas se ríen de nosotros. "¡Pero qué tontos! ¡Cómo se les ocurre llevarse las dos cajas!" ¿Nos habremos equivocado?

A mí me parece que no. El millonario llegó al pueblo con la intención de recompensar a los irracionales, es decir, a los unicajistas. Si hubiéramos podido convencerlo de que también nosotros somos irracionales, bien habría valido la pena. (Y, claro, una vez que quedara convencido, y que las cajas estuvieran selladas, lo racional hubiera sido llevarnos las dos.) Pero para cuando el millonario llegó al pueblo, ya había decidido a quién recompensar y a quien no. Nuestras cajas grandes estaban vacías desde el principio, y de nada nos hubiera servido dejar la pequeña.

Buques de crucero

Agiles rascacielos del mar

Mark Fischetti

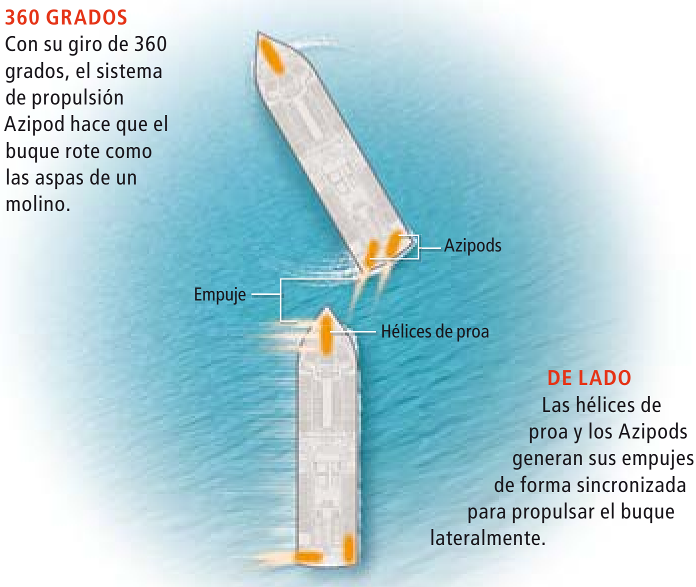
La capacidad de un gran buque de crucero es de 1800 pasajeros o superior, además de unos 800 tripulantes. Increíblemente, muchas de esas estructuras imponentes (tres campos de fútbol de largo y 14 pisos de alto) viran sin problemas en un espacio inverosímil, giran 360 grados sobre sí mismas y navegan de lado.

Durante años, la propulsión de los grandes buques obedeció a una configuración estándar: una hélice trasera con un timón tras ella que gobernaba el rumbo. Pero cada vez más están incorporando un sistema de propulsión innovador, el Azipod, creado por ABB Oy en Finlandia. Este gigantesco conjunto de motor eléctrico y hélice pende, bajo la parte posterior del casco, de una enorme y robusta unión giratoria que permite al mecanismo rotar 360 grados, impulsando al buque en cualquier dirección. Unas hélices de proa de menor tamaño, instaladas transversalmente bajo la línea de flotación en el morro del casco, ayudan a maniobrar la embarcación de costado cuando se acerca a los muelles o para salvar obstáculos.

El *Oosterdam*, propiedad de Holland America Line, constituye un típico representante de los grandes buques oceánicos de pasajeros. Cinco motores diésel, una turbina de gas y dos Azipods impulsan con celeridad y suavidad a este bloque de pisos. Pero la potencia tiene un precio: a velocidad moderada con tres motores en marcha se consumen 184 litros de fuel-oil viscoso por kilómetro; a toda velocidad, con los cinco motores contra el viento y el oleaje, se consumen hasta 307 litros por kilómetro. Para optimizar el rendimiento energético, el ingeniero jefe recalcula cada día las necesidades de combustible y ajusta las operaciones. En ocasiones deben trasegarse de un tanque a otro lastre, combustible y agua dulce, para modificar el comportamiento de la nave.

Cada buque tiene su calado más económico. Incluso el combustible y el agua se van consumiendo de tanques distintos para equilibrar la estiba. En aguas calmadas, unos dos tercios de la potencia generada impulsan el barco; el resto se dedica al placer y confort de sus habitantes.

La magnitud de la maquinaria encerrada en las entrañas de estos barcos es impresionante. Un adulto puede literalmente penetrar en el interior de un motor, que ocupa el espacio de una salita de estar. Unos evaporadores del tamaño de un automóvil pequeño desalan cada uno casi 530.000 litros de agua de mar al día, para proporcionar agua dulce a pasajeros y tripulantes. Los motores se refrigeran mediante circuitos de bucle cerrado de agua dulce, que, a su vez, están refrigerados por bucles cerrados contiguos de agua de mar. Las líneas de cruceros solían ofrecer a los clientes una pequeña vuelta por las entrañas del barco, pero, lamentablemente, la preocupación por el terrorismo ha dado fin a esas breves excursiones internas.



CARACTERISTICAS DEL *OOSTERDAM*

Eslora 285 metros	Velocidad máxima 24 nudos (44,5 kph)	Consumo a máxima potencia 307 litros por kilómetro
Manga 32 metros	Potencia máxima 90.140 cv	Capacidad de combustible 3.270.770 litros
Diámetro de las hélices 5,5 metros	Producción de agua dulce 1.265.860 litros al día	Capacidad del tanque de lastre 6.557.400 litros

¿SABIA USTED QUE...?

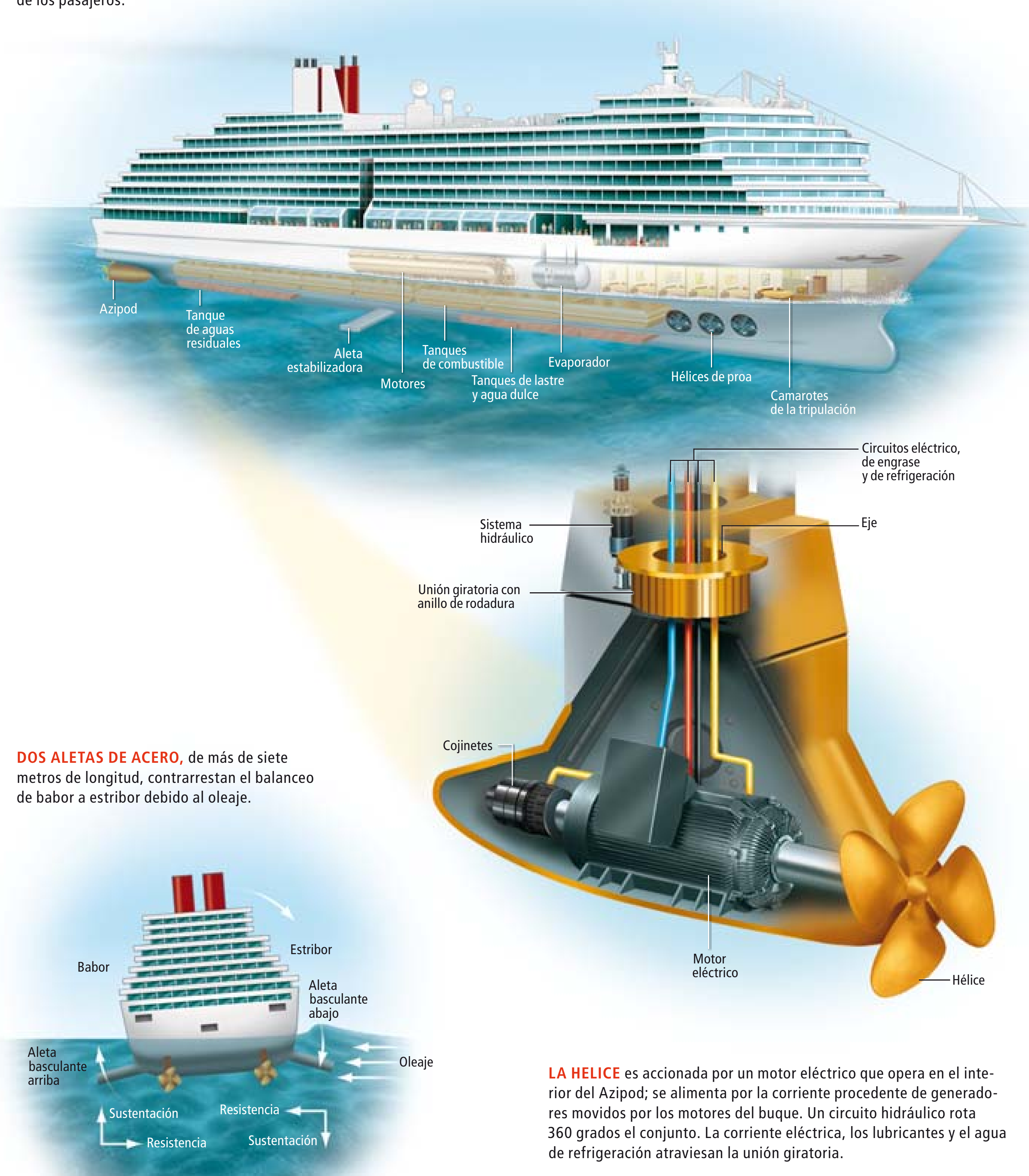
➤ **BARCOS MAS VERDES:** Los cruceros más modernos procesan las “aguas grises” de duchas y desagües para obtener agua limpia para varios fines. Las aguas negras procedentes de los inodoros también se tratan: el agua purificada se descarga en el mar y los residuos sólidos se llevan a tierra. Algunas empresas están experimentando con depuradores de chimenea para filtrar las emisiones de los motores.

➤ **LAS LEYES DEL MAR:** En cuanto los pasajeros entran en un barco, se colocan bajo el sistema legal del país del propietario. El *Oosterdam* navega con bandera holandesa, por lo que todas las personas a bordo están sujetas a las leyes holandesas.

➤ **TRIPULACION OCULTA:** Durante un viaje de una semana, el *Oosterdam* está bajo el cuidado de nueve oficiales de navegación, 17 ingenieros, un oficial de medio ambiente, un oficial de informática, un electricista, un carpintero, un herrero, un tapicero y un enlosador. Los pasajeros reciben las atenciones de 400 azafatas y camareros, todos indonesios y filipinos; esos empleados trabajan siete días a la semana durante 10 meses al año, duermen dos por habitación y se mueven de un lugar a otro por escaleras ocultas.

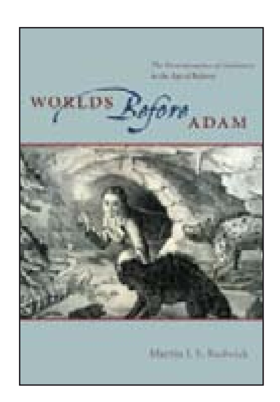
KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

MOTORES, tanques e infinitos sistemas mecánicos están repartidos por las cubiertas inferiores del crucero, pero rara vez a la vista de los pasajeros.

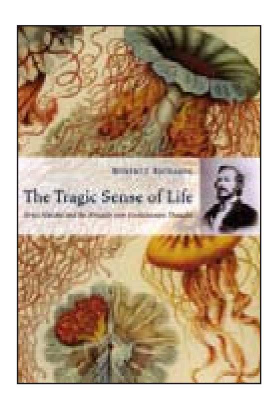


DOS ALETAS DE ACERO, de más de siete metros de longitud, contrarrestan el balanceo de babor a estribor debido al oleaje.

LA HELICE es accionada por un motor eléctrico que opera en el interior del Azipod; se alimenta por la corriente procedente de generadores movidos por los motores del buque. Un circuito hidráulico rota 360 grados el conjunto. La corriente eléctrica, los lubricantes y el agua de refrigeración atraviesan la unión giratoria.



WORLDS BEFORE ADAM.
The Reconstruction of Geohistory in the Age of Reform, por Martin J. Rudwick. The University of Chicago Press; Chicago, 2008.



THE TRAGIC SENSE OF LIFE.
Ernst Haeckel and the Struggle over Evolutionary Thought por Robert J. Richards. The University of Chicago Press; Chicago, 2008.

Peridarwinismo

Las dos pilastras del arco darwinista

La teoría darwinista de la evolución a través de la selección natural tuvo su punto de inspiración en la perspectiva histórica del estudio de la Tierra, la llamada geohistoria (*Worlds before Adam*), y debió su difusión al trabajo incansable de Ernst Haeckel (*The Tragic Sense of Life*). Ambas deudas fueron reconocidas por el propio Darwin.

Mediado el siglo XVIII, y durante la primera mitad de la centuria siguiente, la ciencia dio pasos certeros hacia la reconstrucción de la historia de la Tierra y, en su contexto, la aparición del hombre. Georges Cuvier (1769-1832) y Charles Lyell (1797-1875) tejieron el cañamazo intelectual y seleccionaron las pruebas consolidantes. Sin distraerse en ningún supuesto conflicto entre la geología y el Génesis, abordaron cuestiones nucleares en torno al pasado del planeta. ¿Se había enfriado la Tierra desde su constitución originaria de bola de fuego espacial? ¿Había existido siempre en el mismo lugar? ¿Hubo extinciones en masa? ¿Cambiaron con parsimonia la fauna y la flora en el transcurso del tiempo?

Cuvier publicó en 1812 *Investigaciones sobre huesos fósiles*, donde presentaba la geología como ciencia *histórica*, hilvanada de sucesivas revoluciones o acontecimientos violentos que rompían largos períodos de tranquilidad. Tras la postrera revolución llegó el hombre. Su investigación con Brogniart sobre las rocas de la cuenca de París le mostraban una secuencia de episodios bruscos, repentinos, que alteraron el entorno desde un medio marino hasta otro de agua dulce, y a la inversa. Las rocas terciarias que registraban el evento contenían una fauna de mamíferos bastante afín a la contemporánea. Las rocas subyacentes del Secundario registraban una época que parecía corresponder a una edad de los reptiles, sin presencia de mamífero alguno. Se sucedían rocas de transición, con muy pocos fósiles, paso previo a rocas del Primario, que constituían la base de la columna geognóstica, o estratigráfica. El Primario no contenía fósil alguno; precedió al origen de la vida.

En rocas de Lías habían fosilizado reptiles extraños. El ictiosaurio, plesiosaurio y otros saurios adquirirían sentido si se les situaba en las coordenadas temporales correctas. En 1817 William Smith dio a luz su *Stratigraphical System of Organized Fossils,* donde exponía los métodos empleados para levantar el mapa geológico de Inglaterra y Gales. La estratigrafía smithiana transformó la geognosia, que se centraba en las formaciones espaciales de roquedales de todos los tipos. El recurso a los "fósiles característicos" para distinguir entre formaciones rocosas fue ganando en aceptación, al par que se enriquecía la geognosia. Henri Marie Ducrotay de Blainville, discípulo de Cuvier, acuñó el término paleontología en 1822; los fósiles comenzaban a despertar interés por sí mismos.

El descubrimiento de micromamíferos singulares en los mismos estratos en que apareció el megalosaurio de William Buckland no supuso ninguna amenaza contra la tesis de Cuvier sobre la identificación de las formaciones del Secundario con la edad de los reptiles. Los fósiles desenterrados en el Terciario constituían, resultaba manifiesto, un puente entre el Secundario y el mundo actual. Y así cupo interpretar el hallazgo de Buckland en Kirkdale, en 1822: una cueva de hienas extintas con la carroña dispersa por el suelo. Presumía que esa megafauna había sido barrida por un episodio geológico reciente, un "diluvio" que equiparó con el escriturístico. Idea que no compartieron quienes atribuían la supuesta extinción repentina a un proceso pausado sin "revoluciones" drásticas. Con ello se planteaba una cuestión ambiciosa, la relación entre el mundo actual y los episodios de la geohistoria.

Así se introdujo el debate sobre las "causas actuales" para explicar la geohistoria. De hecho, fue la opción metodológica empleada por Cuvier, quien se servía del presente como clave principal para interpretar el pasado. Su identificación de huesos fósiles como pertenecientes a especies distintas de cualquier otra viva conocida y, por tanto, su inferencia de que hubo una extinción en masa como última "revolución", derivaba de una rigurosa comparación entre huesos fósiles y huesos de animales vivos.

Cuvier reconocía, empero, limitaciones de las causas actuales para interpretar las "revoluciones". John Playfair abanderó la opinión contraria: las causas actuales podían explicar *todos* los episodios del pasado. Ni los viajes y expediciones que por entonces se impulsaron y aportaron una masa ingente de información sobre geografía física resolvieron la cuestión. El debate adquirió tal viveza, que la Universidad de Göttingen estableció un premio para quien demostrara qué efectos ejercen las causas actuales en el curso de la historia humana. El premio fue ganado por Karl von Hoff, quien aportó un inventario exhaustivo de los cambios

históricos registrados en la geografía física, erupciones volcánicas y terremotos. Von Hoff, que se había documentado en la bibliografía, aplicó la estadística a la historia.

En la controversia desempeñaron un papel crucial los movimientos de la corteza terrestre. Que se habían producido tales movimientos y a una escala imponente, se comprobaba en los estratos plegados de las montañas. De la subida del nivel del mar daban cuenta notables testimonios arqueológicos. Se aceptaba también que la potencia de los estratos indicaba un lapso de tiempo muy dilatado. De la mano de Fourier volvió la teoría del enfriamiento de la Tierra: dedujo el brusco descenso inicial de temperatura a partir de un intensísimo calor, para ir luego disipándose de una manera más lenta. Lyell asoció las reconstrucciones paleoecológicas con inferencias significativas sobre los movimientos tectónicos de la corteza terrestre operados contemporánea o posteriormente. En el establecimiento del carácter direccional de la geohistoria, o al menos de la historia de la vida, las formaciones del Terciario llevaron el peso de la prueba.

Con todo, la última revolución o el "diluvio geológico", la frontera de separación entre el mundo contemporáneo y el pasado, permanecía envuelta en el misterio. Se discutía el momento, no su realidad. Adam Segdwick distinguió dos clases de depósitos superficiales: los "aluviales", que eran producto de causas actuales ordinarias, y los "diluviales", de origen diferente. Los valles de las regiones montañosas se aducían también para mostrar la realidad del brusco episodio diluvial, observada su incompatibilidad con la acción de las causas actuales. Aunque con mucho la prueba más contundente de la naturaleza excepcional de la "última revolución" fue la de los bloques erráticos dispersos por toda Europa occidental, que se habían desplazado hasta centenares de kilómetros de su lugar de origen.

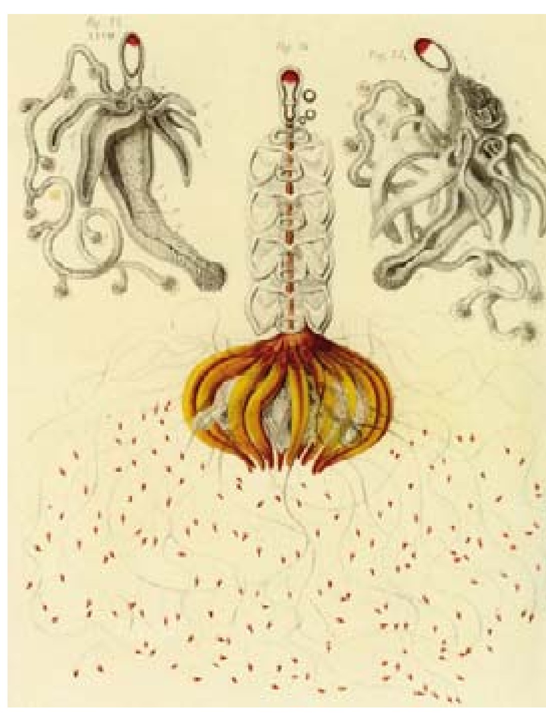
La realidad de la extinción, entendida como un proceso que había operado en la Tierra mucho antes de la aparición del hombre, apenas si encontró resistencia. Pero el transformismo lamarckista, que sostenía que todas las formas orgánicas se habían encontrado siempre en un estado de flujo continuo y ordenadas hacia la complejidad y la perfección, seguía siendo atractiva para muchos, aunque no para los paleontólogos, afianzado en el concepto cuvieriano de especies discretas, cada una adaptada a un modo particular de vida. Etienne Geoffroy Saint-Hilaire sugería, sin embargo, que las especies fósiles podían haberse transformado en las especies vivas bajo la presión de unas condiciones ambientales durante las "revoluciones" drásticas.

En el ecuador del decenio de 1820, entra en escena Lyell, con una serie de ensayos en *Quarterly Review*. Establece los principios y objetivos de la geología. Considera direccional la geohistoria, en términos de un enfriamiento global paulatino y de un progresivo archivo fósil. Recorre Francia e Italia; estudia suelos y recoge fósiles sin cuento, convencido de que las causas actuales se bastaban para explicar el pasado profundo, no sólo en clase, sino también en grado, de los procesos geológicos. No se opone a que, en determinados momentos, se desaten episodios violentos de cambio repentino. Se propone así contrarrestar la amenaza planteada por el transformismo lamarckista contra la dignidad humana. En 1830 inicia la entrega de sus *Principios de Geología*, aplaudidos en célebre reseña por William Whewell, que bautiza como "uniformitarista" la geohistoria estacionaria de Lyell. Leyendo sus páginas, Darwin maduró su tesis biohistórica.

A finales del invierno de 1864, Darwin recibía dos volúmenes en folio sobre los radiolarios, una clase extensa de organismos unicelulares marinos que segregaban un esqueleto de sílice con geometrías insólitas. Su autor, un joven biólogo alemán, Ernst Haeckel (1834-1919), quien había dibujado personalmente las figuras para los grabados. La belleza gótica de las planchas impresionó a Darwin, aunque debiera haber reparado también en los pasajes donde se aplicaba la teoría expuesta en el *Origen de las especies* a la construcción de relaciones de filogenia de aquellos seres mínimos. Días más tarde, recibió un recorte de periódico sobre la defensa que Haeckel había hecho de la evolución. Darwin le envió una carta donde señalaba agradecido que era uno de los pocos que había entendido su doctrina de la selección natural.

Terminada la carrera de medicina, Haeckel decidió dedicarse a la investigación zoológica. Preparó su tesis de habilitación sobre los radiolarios. Bajo el microscopio comenzaron a aparecer nuevas especies de radiolarios. Determinó que tenían un cuerpo blando constituido por una cápsula central, con una vesícula interna y rodeada de vesículas menores, a través de las cuales emergían pseudópodos filiformes. A tenor de la familia, el esqueleto envolvía la cápsula central (los Polycystinae solitarios) o se extendían hacia el interior de la cápsula (los Acanthometra y los Polycystinae coloniales). En 1862 Haeckel publicó sus *Die Radiolarien (Rhizopoda, Radiolaria)*. La monografía que tanto sorprendió a Darwin constaba de 570 páginas el primero y 35 planchas de cobre el segundo. Los radiolarios aportaban la apoyatura empírica necesaria para la teoría de la evolución, puesto que el parentesco de muchas especies en familia denunciaba su genealogía y había especies de transición entre unas familias y otras.

La difusión del darwinismo, hasta convertirlo en una religión, correría a cargo de Haeckel. Su *Historia natural de la creación* ("Natürliche Schöpfungsgeschichte", 1868) se tradujo a numerosos idiomas. Tuvieron asimismo repercusión *Los enigmas del mundo* ("Die Welträthsel", 1899), que situó las ideas evolucionistas en un contexto filosófico y social mucho más amplio. Con Haeckel se pasa de la historia natural persistente a una historia real de la evolución orgánica. Avanzó un sistema de 12 especies humanas, empezando por el *Lophocomus hottentotus* y acabando con el *Euplocomus*



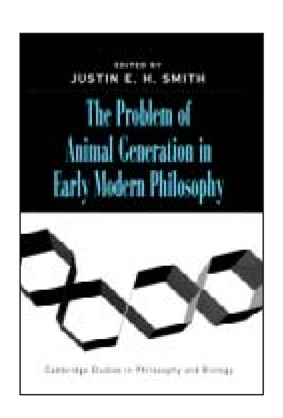
***Physophora magnifica*, flanqueada por dos larvas en distinta etapa de desarrollo.**

mediterraneus. Esta obsesión por poner orden y clasificar le llevó a considerables extravagancias, como fue proponer una escala psicosomática ("Stufenleiter der Seelensleben"), que iba desde el alma atómica ("Atomseele) hasta el duodécimo peldaño (der Geist der Kultumenschen). Sugirió el reino de los protistas, organismos microscópicos y unicelulares, distintos tanto de las plantas como de los animales. Creó unos 2000 nombres de géneros y describió más de 3500 especies, principalmente marinas, en su mayoría radiolarios, esponjas y celentéreos. (Entre 1856 y 1889 publicó cuatro grandes monografías sobre Radiolarios, Calcispongias, Medusas y Sifonóforos, respectivamente.)

Se le cuentan una veintena de neologismos. Entre ellos, el de ecología, ciencia de las interacciones de unos organismos con otros, o el de "corología", ciencia de la distribución topográfica y geográfica de los organismos. Introdujo la expresión del "eslabón perdido" para designar la existencia de formas intermedias entre los grandes simios y el hombre. Y promulgó la "ley biogenética": la ontogenia recapitula la filogenia, es decir, el embrión de una especie contemporánea procede a través de los mismos cambios morfológicos en su desarrollo que sus precursores tuvieron en su progenie evolutiva. Lo mismo que Darwin, creía en la herencia de caracteres adquiridos en el curso de la vida. Resolvió los ciclos reproductivos de numerosos invertebrados marinos e identificó el núcleo celular como el portador del material de la herencia. Y en su *Generelle Morphologie der Organismen*, publicada en 1866, declaraba que todos los metazoos pasarían por una fase embrionaria de gástrula.

Haeckel no ha gozado del favor de los historiadores de la ciencia. E. S. Russell, cuyo juicio suele ser siempre muy ponderado, consideraba que la obra teórica principal de Haeckel, su *Generelle Morphologie,* no era tanto una representación del darwinismo cuanto del pensamiento predarwinista, mezcla de materialismo dogmático, morfología idealista y teoría evolutiva. Gavin de Beer le reprochaba haber encorsetado la embriología en una camisa de fuerza que impidió el progreso de la biología. Peter Bowler respalda esos juicios y asevera que la ley biogenética ilustra el carácter no darwinista del evolucionismo de Haeckel. Para Bowler, la teoría de la evolución de Haekel constituye una ideología que crea una trayectoria lineal y progresiva hacia el hombre. Para Gasman, el darwinismo social de Haeckel constituyó una de las causas principales en la formación del movimiento nazi. Richards se propone aquí rescatarlo de ese infierno.

Luis Alonso



THE PROBLEM OF ANIMAL GENERATION IN EARLY MODERN PHILOSOPHY,
por Justin E. H. Smith.
Cambridge University Press; Nueva York, 2006.

Filosofía y biología

El problema filosófico de la autoorganización animal

Este libro es el primer trabajo colectivo dedicado exclusivamente al problema de la generación animal en la filosofía y la ciencia modernas. Escrito por un grupo de diecisiete especialistas internacionales coordinado por Justin E. H. Smith, profesor de filosofía de la Universidad de Concordia (Montreal), aborda el problema de la generación de forma global, desde la concepción animal, la herencia y el desarrollo fetal, teniendo como objetivo los saberes acerca de la autoorganización de las diferentes entidades en la naturaleza y su explicación como un fenómeno mecánico o vital.

El análisis de la influencia del tratamiento contemporáneo de las cuestiones filosóficas tradicionales sirve a los autores para demostrar de qué manera los presupuestos filosóficos acerca del mecanismo, la sustancia y la causa vertebraron las interpretaciones por ellos ofrecidas, llevando a la investigación empírica de la reproducción animal.

La obra aparece dividida en siete grandes bloques, subdivididos en capítulos, que se ocupan respectivamente del nacimiento de una nueva era en el estudio de la generación, el programa cartesiano, la alternativa gassendiana, el retorno del alma animal, el debate entre el epigenismo y el preformacionismo y Kant ante el problema de la materia organizada y del comienzo de la evolución. Se completa con un extenso apéndice bibliográfico que presenta separadamente las fuentes primarias y las secundarias.

Tras situar en el siglo XVII el comienzo de una nueva era en los estudios sobre la generación, se sintetiza la visión mecanicista de Descartes, para quien la formación de los órganos no depende de un alma vegetativa al modo aristotélico, sino que constituye un proceso mecánico. Gassendi, por el contrario, distingue un alma material, generada a partir del alma de los organismos paternos, de una inmaterial, investida en el ser humano por la divinidad en el momento de la individuación, en la misma línea que Aristóteles y los tomistas. La segunda mitad del siglo vio una vuelta al mecanicismo, que parecía explicar cualquier tipo de fenómeno natural, aunque autores como Anne Conway empezaron a considerar la existencia de posibles fuerzas "ocultas", sobre todo ante la posibilidad de la generación espontánea. En el cambio de siglo se vivió una intensa confrontación entre quienes defendían la preexistencia de los organismos, presentes desde siempre bien en el óvulo, bien en el esperma, y quienes optaban por un desarrollo fetal debido a medios naturales. Por último, se sitúan adecuadamente la intervención de Stahl en el debate de la generación, con su noción del alma como arquitecto divino del cuerpo humano, y las aportaciones de Kant y contemporáneos suyos como Maupertuis y Blumenbach al desarrollo de la materia organizada.

El modo en que se analizan las relaciones entre la filosofía y las ciencias naturales hace a esta obra especialmente atractiva para los estudiosos de la historia de la filosofía y de la ciencia.

María José Báguena Cervellera

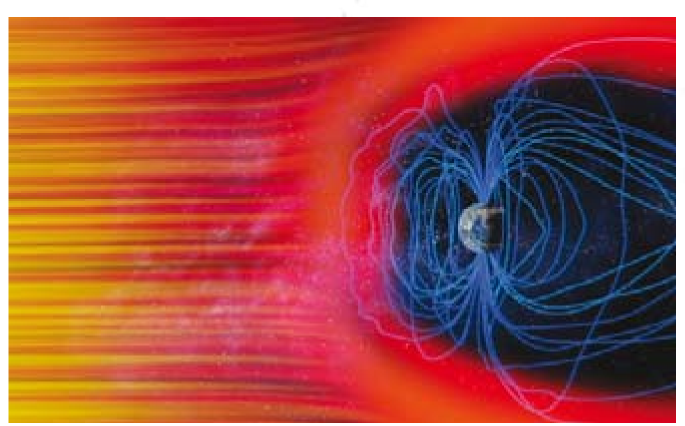
EN EL PROXIMO NUMERO DE OCTUBRE 2008



Crisis del agua,

por Peter Rogers

El consumo creciente de agua amenaza con acabar con los recursos hídricos del planeta. Las técnicas que impedirían una crisis global, disponibles, deberían aplicarse de inmediato.



Supertormentas solares,

por Sten F. Odenwald y James L. Green

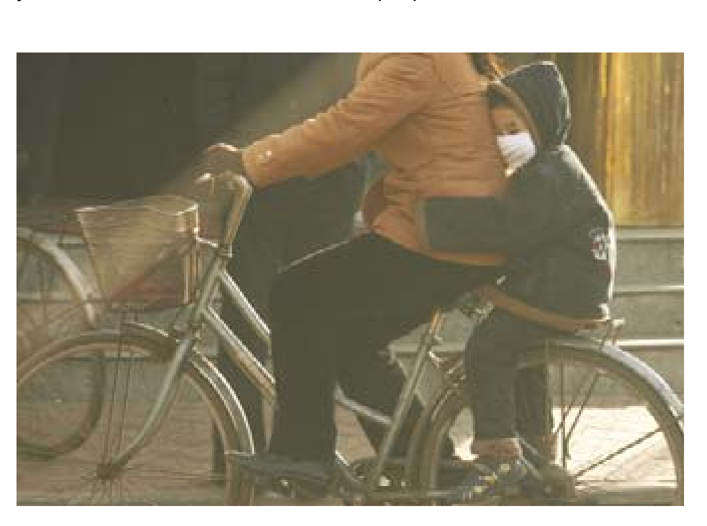
Si se repitiera una supertormenta solar como la de 1859, los daños producidos en satélites, redes eléctricas y radiocomunicaciones alcanzarían proporciones de catástrofe.

El descubrimiento del ADN,

por Ralf Dahm

Son muy pocos quienes conocen al verdadero descubridor de la molécula de la vida, 75 años antes de que Watson y Crick revelaran su estructura.





Trastornos genéticos provocados por la contaminación atmosférica,

por Dan Fagin

La investigación epidemiológica pone de manifiesto la repercusión de la contaminación en la salud y el desarrollo de la población infantil china.

Plasmones superficiales,

por Francisco J. García Vidal y Luis Martín Moreno

Debido a su carácter bidimensional y capacidad de almacenar luz en espacios reducidos, los plasmones superficiales son firmes candidatos para desempeñar una función clave en futuros dispositivos ópticos.